SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

©SCIENCE PHOTO LIBRARY VIA AFP
SCIENCE PHOTO LIBRARY/JJI POELYN

SEPTEMBRE 2020 - N° 883 - ALLEMAGNE 7,40 € / AUTRICHE 6,50 € / BELGIQUE 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / ITALIE 5,70 € / DOM 5,90 € / ANDORRE 5,40 € / LUXEMBOURG 5,70 € / PORTUGAL 5,70 € / TOM 800 XPF / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 6,50 CHF / TUNISIE 16 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

L 13418 - 883 - F: 5,30 € - RD

Pourquoi la MATIÈRE a gagné sur L'ANTIMATIÈRE

Découverte de la difference neutrinos-antineutrinos

p.30

MIGRAINE

p.64

ET MAUX DE TÊTE

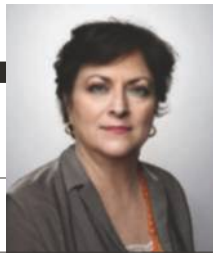
- 4 médicaments novateurs
- Les conseils

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 883 - SEPTEMBRE 2020 - POURQUOI LA MATIÈRE A GAGNÉ SUR L'ANTIMATIÈRE

MORGAN LAGRAVIÈRE
SKIPPER INTERNATIONAL

MGEN, Mutuelle Générale de l'Éducation Nationale, immatriculée sous le numéro SIREN 775 685 399, mutuelle soumise aux dispositions du livre II du Code de la mutualité. Siège social : 3 square Max-Hymans -75748 Paris CEDEX 15. RESSOURCES MUTUELLES ASSISTANCE, Union d'assistance soumise aux dispositions du Livre II du Code de la mutualité, immatriculée au répertoire Sirène sous le numéro SIREN 444 269 682 – Siège social : 46, rue du Moulin - CS 32427 - 44124 Vertou CEDEX. Le détail des garanties et conditions figure aux Statuts et Règlements mutualistes collectifs remis lors de l'adhésion. MGEN, Mutuelle Générale de l'Éducation Nationale, immatriculée sous le numéro SIREN 775 685 399, MGEN Vie, immatriculée sous le numéro SIREN 441 922 002, MGEN Filia, immatriculée sous le numéro SIREN 440 363 588, mutuelles soumises aux dispositions du livre II du Code de la mutualité. MGEN Action sanitaire et sociale, immatriculée sous le numéro SIREN 441 921 913, MGEN Centres de santé, immatriculée sous le numéro SIREN 477 901 714, mutuelles soumises aux dispositions du livre III du Code de la mutualité. Siège social : 3 square Max-Hymans -75748 Paris CEDEX 15.

ÉDITO



BERNARD MARTINEZ

Dominique Leglu
Directrice de la rédaction

Pour l'honneur de l'esprit humain

Jamais équation, sauf peut-être l'E = mc² d'Albert Einstein, n'aura autant fait travailler les expérimentateurs. Qu'ils se postent derrière leurs télescopes pour scruter le fin fond du cosmos ou alors s'affairent en laboratoire à piéger des particules évanescentes pour leur extorquer leurs secrets. Le dossier sur l'antimatière que propose *Sciences et Avenir-La Recherche*, le nouveau grand magazine mensuel scientifique français, réunissant les forces de deux rédactions, celle du mensuel grand public *Sciences et Avenir* né en 1947 et celle de la publication spécialisée *La Recherche* apparue en 1970, veut rendre hommage à cette admirable persévérance du monde scientifique, à l'occasion de résultats très prometteurs (p. 31). Hommage à l'audace de Paul Dirac, qui formula en 1928 la fameuse équation d'où émergea, avança-t-il, l'impérieuse nécessité d'introduire un double de l'électron. De charge électrique opposée, le positon (ou positron) était né, première particule d'antimatière qui allait être suivie d'une longue cohorte. Hommage à ceux qui œuvrent aujourd'hui pour résoudre le mystère jumeau, né lui aussi de l'équation : pourquoi l'antimatière a-t-elle disparu de l'Univers ? Hommage à ces chercheurs, dont la qualité des travaux et la probité des publications garantissent une science internationale de qualité. Une science qui fait honneur à l'esprit humain, comme l'écrivit jadis Jean Dieudonné, rendant ainsi hommage à ses collègues mathématiciens. C'est avec chaleur que Sciences et Avenir-La Recherche accueille ces scientifiques à qui on peut faire confiance. Ils traduisent en direct des expériences sans arrêt recommencées, des connaissances en perpétuelle évolution, des lois qui finissent par être établies et reconnues par toutes et tous, des savoirs qui deviennent universels. Nos lectrices et lecteurs de La Recherche pourront les retrouver tous les mois, au cœur des dossiers comme les physicien.ne.s Pauline Comini et Gabriel Chardin (p. 36). À la tête de chroniques déchiffrant le climat comme Christophe Cassou et Céline Guivarch (p. 63) explorant l'univers des mathématiques comme Aurélien Alvarez (p. 47), ou le professeur britannique Ian Stewart (p. 92) que nous avons toujours plaisir à lire*. Des dialogues s'établiront tel celui mené avec les psychologues rompus aux technologies du numérique Séverine Erhel et Serge Tisseron (p. 88). Nous retrouverons l'analyse toujours acérée de Jean-Gabriel Ganascia, président du comité d'éthique du CNRS. En cette très spéciale rentrée 2020, il ne pouvait manquer de s'interroger sur la suspicion qui règne autour des vaccins (p. 91). Et ce, alors même que la lutte s'intensifie pour se débarrasser de ce Sars-Cov-2 qui sème le désarroi autour de la planète (p. 72). Que toutes et tous ces scientifiques soient ici remercié.e.s pour leur aide à la compréhension par les lecteurs de *Sciences et Avenir-La Recherche* d'un monde toujours aussi fascinant. ■ @dominiqueleglu

* Lire aussi « 17 équations qui ont changé le monde », *S. et A.* n° 808, juin 2014.

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

Pour joindre la rédaction : 41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris - Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr - Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrices de la rédaction
Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
assistée de Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01 - Carole CHATELAIN (adjointe) - 01.55.35.56.57

Rédacteur(trice)s en chef
Philippe PAJOT (La Recherche) - 01.70.98.19.29
Vincent REA (hors-série) - 01.55.35.56.35
avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Olivier LASCAR (digital) - 01.55.35.56.15

Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10

Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Mathieu NOWAK (actualités - rendez-vous) - 01.55.35.56.38

Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59 - Jean-Louis GILABERT (directeur artistique) - 01.55.35.56.28
Maryvonne MARCONVILLE (directrice artistique) - 01.70.98.19.28
Thalia STANLEY (directrice artistique adjointe) - 01.55.35.56.21

Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18

Chef(fe)s de service
Azar KHALATBARI (fondamental, sciences de la Terre) - 01.55.35.56.46
Rachel MULOT (enquêtes) - 01.55.35.56.07

Chef de service adjoint
Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45

Chef(fe)s de rubrique
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33 -
Sylvain GUILBAUD (fondamental) - 01.70.98.19.38 - Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54 - Bérénice ROBERT (environnement) - 01.70.98.19.34

Rédaction
Bernadette ARNAUD grande reporteure (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.44
Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78 - Arnaud DEVILLARD (numérique, data) - 01.55.35.56.27 - Olivier HERTEL (technologie, futur) - 01.55.35.56.03 -Hugo JALINIÈRE (médecine, biologie) - 01.55.35.56.52 - Sylvie ROUAT (espace, océanologie) - 01.55.35.56.40 - Elena SENDER grande reporteure (biologie, neurosciences) - 01.55.35.56.43

Collaborateurs(trices)
Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN

Chroniqueurs
Aurélien ALVAREZ, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH

Ont participé à ce numéro
Thomas ALLARD, Marine BENOIT, Pierre BERLOQUIN, Héloïse CHAPUIS, Pierre KALDY, Coralie LEMKE, Claire MANIÈRE, Hugo RUHER, Muriel de VÉRICOURT

Secrétaire de rédaction
Frank MIETTON (1re secrétaire) - 01.55.35.56.17 - Anaëlle BRUYAND (1re secrétaire) - 01.70.98.19.35

Maquette
Horia BAHRI - 01.55.35.56.19

Photo-iconographie
Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41

Pôle digital
Joël IGNASSE (rédacteur spécialisé) - 01.55.35.56.15 - Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Camille GAUBERT (rédactrice santé) - 01.55.35.56.24 - Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70 - Clémence BAUDOIN - responsable projets digitaux
Jessica RIOS - cheffe de projet digital

Documentation Isabelle DO O'GOMES (cheffe de service) - 01.55.35.56.49
Astrid SAINT AUGUSTE - 01.55.35.56.48

Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr

Informatique
Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06

Comptabilité - Ressources humaines
Mélanie BENKHEDIMI - 01.55.35.56.14

Fabrication Christophe PERRUSSON

Publicité MediaObs. 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris
Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com

Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGIE - 01.44.88.93.70

Directeur de publicité
Sylvain MORTREUIL - 01.44.88.97.75

Abonnements et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc
60647 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros) : 35 €. 1 an complet (12 numéros + 4 hors-séries) : 48 €.
Tarifs pays étrangers sur demande.

Abonnements Belgique : Partner Press, tél. : 00.32.2.556.41.40 – www.viapresse.be

Directrice de clientèle et responsable Web
Karine GROSSMAN - 01.44.88.89.08

Assistante commerciale
Séverine LECLERC - 01.44.88.97.57

Exécution : Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05

Administration des ventes
Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20

Directeur commercial Valéry SOURIEAU

Partenariat Joëlle HEZARD - 01.58.65.09.99

Directeur des abonnements Luc BONARDI

Responsable des abonnements
Lina QUACH - 01.55.35.56.63

Sciences et Avenir SAS
Président, Directeur de la publication : **Claude PERDRIEL**

Secrétaire général
Jean-Claude Rossignol

Multimédia Sciences et Avenir, 41 bis, avenue Bosquet, 75007 Paris. Tél. : 01.55.35.56.00.

PEFC 10-31-3364 PEFC recyclé Ce produit est issu de sources recyclées et contrôlées. pefc-france.org

Origine du papier : Italie
Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,017 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Newsprint (Lieusaint), certifié PEFC

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comprend : un message Sophia Boutique « l'Atlas historique Mondial » , un message «Challenges» , un message « L'objet du mois- L'Obs » sur la totalité de la diffusion abonnés et un message « Sciences Humaines » sur une partie de la diffusion abonnés. Commission paritaire n° 0620 K 79712. ISSN 00368636. Distribué par Presstalis.

NOUVEAUTÉ 2021

Renvoyez ce coupon à Croisières d'exception - 77 rue de Charonne - 75011 Paris

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : ..... Ville : .....

Tél. : ..... E-mail : .....

Conformément à la loi "Informatique et Liberté" du 6 janvier 1978, nous vous informons que les renseignements ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande et que vous disposez d'un droit d'accès, de modification et de rectification des données vous concernant. * Se référer à la brochure pour le détail des prestations et les conditions générales de vente. Les conférenciers seront présents sauf cas de force majeure. Licence n° IM075150063. Photos : © AdobeStock, © Cunard Line et © Croisières d'exception.

sa-2009-2109-QM2

CROISIÈRE

Embarquez avec Franck Ferrand sur le Queen Mary 2

Du 24 septembre au 2 octobre 2021

Le Queen Mary 2 - Baie d'Hutson

En **septembre 2021**, revivez l'épopée des grandes transatlantiques à bord du magnifique **Queen Mary 2** au côté de nos invités de renom : **Franck Ferrand**, historien, écrivain et journaliste, et **Serge Legat**, historien d'art, qui vous feront vibrer au rythme de passionnantes conférences. Après sept nuits en mer et une arrivée magique à l'aube du huitième jour à **New York**, vous pourrez prolonger votre croisière par un **séjour au coeur de la ville** (option).

OFFRE SPÉCIALE **Réduction de 300 €/pers.** pour toute réservation avant le 30 septembre 2020 (code REVE)

soit la croisière à partir de ~~3 990 €~~ **3 690 €/pers.*** au départ de Paris

Transport en train Eurostar de Paris à Londres en 1re classe, puis transfert vers Southampton, vol retour de New York à Paris sur vol régulier en classe économique, pension complète (hors boissons), conférences et taxes inclus. Départ de province possible : nous consulter.

Demandez la brochure au **01 75 77 87 48**, par e-mail à **contact@croisieres-exception.fr**
ou sur **www.croisieres-exception.fr/brochures** (code **VAQM2** à renseigner),
ou dans votre agence de voyages habituelle.

Croisières d'exception
devient ***Voyages d'exception***

PORTES OUVERTES DU 11 AU 14 SEPTEMBRE*

CITROËN

SILENT URBAN VEHICLE

CITROËN C5 AIRCROSS HYBRID
HYBRIDE RECHARGEABLE

LE SUV EN CLASSE Ë-CONFORT

CITROËN ADVANCED COMFORT

20 aides à la conduite**
Recharge accélérée en moins de 2 heures
55 km d'autonomie en mode 100 % électrique
Suspensions avec Butées Hydrauliques Progressives®
Puissance cumulée thermique et électrique de 225 ch

COMMANDEZ-LE MAINTENANT

INSPIRED BY YOU ALL

silent urban vehicle = *le véhicule urbain silencieux.*

Citroën préfère Total *selon autorisation préfectorale. **selon version ou motorisation.

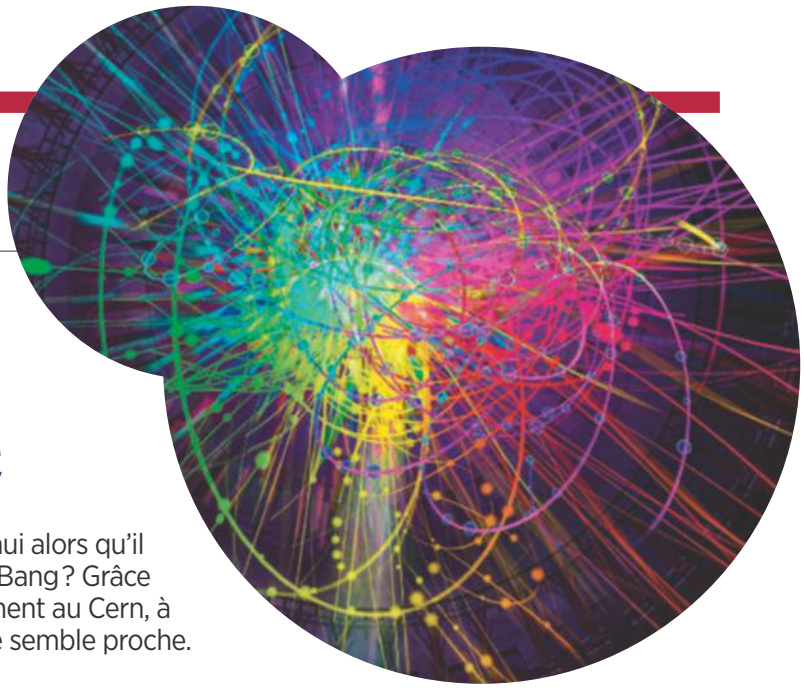
CONSOMMATIONS MIXTES ET ÉMISSIONS DE CO_2 DE SUV CITROËN C5 AIRCROSS : WLTP DE 1,4 À 7,4 L/100 KM ET DE 32 À 167 G/KM.

COVID-19 RESPECT REGLES SANITAIRES

AUTOMOBILES CITROËN - RCS PARIS 642 050 199

SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche
N° 883 - Septembre 2020



DOSSIER P. 30

Sur la piste de L'antimatière

Où est passée l'antimatière, introuvable aujourd'hui alors qu'il s'en est formé autant que de matière lors du Big Bang ? Grâce aux expériences menées dans le monde, notamment au Cern, à Genève, la réponse à cette énigme cosmologique semble proche.

3 **Édito** par Dominique Leglu
7 **Solution des jeux La Recherche**

ÉVÉNEMENT

10 **Alzheimer : la piste des ultrasons**
16 **À Beyrouth, la répétition d'un scénario trop bien connu**

SCIENCES FONDAMENTALES

18 **ACTUALITÉS** / Cap sur Mars / Mystérieuse onde gravitationnelle / Thomas Pesquet va retourner dans l'espace
40 **Les défis du plus puissant synchrotron**
44 **Un grand mur dans le ciel austral enrichit la carte du cosmos**
47 **Mars aurait eu une jeunesse glacée**

HISTOIRE

20 **ACTUALITÉS** / La plus ancienne trace d'activité humaine en Amérique/ Un mammouth extrêmement bien conservé
48 **L'art celte magnifié**
52 **Le passé des vieilles poteries s'éclaire**
55 **L'origine des mégalithes de Stonehenge enfin découverte**

NATURE

22 **ACTUALITÉS** / Comment les poissons peuplent les lacs isolés / Après Notre-Dame, du plomb dans le miel / Une norme pour la biodiversité
56 **La génétique au secours des lions**
60 **Un partage intelligent de l'énergie solaire**
63 **Le salut du coléoptère passe par l'anus**

Les lions en quête de diversité génétique **p. 56**

De nouveaux médicaments contre la migraine **p. 64**

Dialogue entre Séverine Erhel et Serge Tisseron sur les écrans et l'apprentissage **p. 88**

SANTÉ

24 **ACTUALITÉS** / Du cartilage humain créé dans l'espace / Ce gant traduit la langue des signes
64 **Une avancée majeure dans le traitement de la migraine**
70 **Nutrition : le gingembre réveille les papilles**
72 **Covid-19 : les 7 questions de la rentrée**
75 **Identifier des tumeurs grâce aux nœuds dans l'ADN**
76 **Ce que l'on sait des effets du café sur la santé**

HIGH-TECH

28 **ACTUALITÉS** / Un dauphin artificiel plus vrai que nature / Les lampes sont des mouchardes
78 **La transition écologique prend l'avion**
82 **L'électronique s'inspire des connexions du cerveau**
85 **Un panneau photovoltaïque dans le corps**
86 **Comment ça marche : le temps de la maturité pour la trottinette électrique**

RENDEZ-VOUS

88 **La Recherche Dialogue sur le bon usage des écrans dans l'apprentissage**
92 **Autour d'un livre**
94 **Sélection livres**
96 **Expositions**
97 **Le ciel de septembre**
98 **Jeux**

La Recherche RETROUVEZ NOS NOUVELLES CHRONIQUES

47 **Maths : Aurélien Alvarez**
63 **Climat : Christophe Cassou et Céline Guivarch**
91 **Éthique : Jean-Gabriel Ganascia**

JEAN-FRANCOIS PODEVIN/SCIENCE PHOTO LIBRARY - MICHAEL NICHOLS/NATIONAL GEOGRAPHIC IMAGE COLLECTION - SCIENCE PHOTO LIBRARY VIA AFP - PHOTOS ET MONTAGE RÉALISÉS PAR BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

VOUS ÊTRE **UTILE**

Mettez votre famille à **l'abri** pour moins de 6€/mois*.

SECUR'FAMILLE 2

Pour vous aider à sécuriser financièrement l'avenir de votre famille.

Document à caractère publicitaire.

*Cotisations pour un assuré de 35 ans et un capital garanti de 30 000 € en formule Optimal (tarif en vigueur au 15/06/2020). Selon limites, conditions et exclusions prévues dans les engagements contractuels en vigueur. Retrouvez le document d'information sur le produit (DIP) concernant le contrat d'assurance décès SECUR' Famille 2 : http://dda.assurances.natixis.com

SECUR' Famille 2 est un contrat d'assurance en cas de décès de BPCE Vie et de BPCE Prévoyance.
Les prestations d'assistance sont assurées par Inter Mutuelles Assistance. Entreprises régies par le Code des assurances.

BPCE - Société anonyme à directoire et conseil de surveillance au capital de 170 384 630 euros. Siège social : 50, avenue Pierre Mendès France 75201 Paris Cedex 13 - RCS Paris n° 493 455 042, intermédiaire d'assurance immatriculé à l'Orias sous le N° 08 045 100. ALTMANN + PACREAU - Crédit Photo : Getty Images.

CAISSE D'EPARGNE

Solutions des jeux de l'été parus dans « La Recherche » n° 561-562, juillet/août 2020

C'est le moment de s'évader !

1. Garder ses distances

Réponse : Bob est plus grand qu'Alice
Explication : 3 cas sont possibles (nous désignerons Alice par A et Bob par B) :
• A et B sont dans la même rangée. Par définition, A est la plus petite de la rangée. Elle est donc plus petite que B.
• A et B sont dans la même colonne, et par définition, B est le plus grand de cette colonne. Il est donc plus grand que A.
• A et B ne sont ni dans la même ligne ni dans la même colonne, et c'est leur ami Cédric (noté C) qui est à l'intersection de la ligne de A et de la colonne de B. Alors, on a à la fois A plus petite que C, et C plus petit que B, c'est-à-dire là aussi A plus petite que B.

2. La clé de la liberté

Réponse : La clé C est la clé de la liberté.
A : Cellier, **B :** Salle des gardes, **C :** Liberté, **D :** Cuisine, **E :** Armurerie.
Explication : On commence par déduire que la salle des gardes est la B (la seule qui ne soit jamais à une extrémité).
Les seules clés à se côtoyer dans les deux configurations sont AB et DE. Mais comme B est celle de la salle des gardes, celles de l'armurerie et de la cuisine sont D et E.
Mais comme E côtoie B, ce ne peut être la clé de la cuisine, qui est donc D.
D côtoyant C, C ne peut être la clé du cellier, c'est donc celle de la liberté.

3. L'évasion des Dalton

Réponse : Les Dalton peuvent sortir de la tour en 12 tours.
Explication :
1. Joe (40 kg) descend seul.
2. William (45 kg) descend tandis que Joe (40 kg) remonte.
3. Jack (50 kg) descend tandis que William (45 kg) remonte.
4. Joe (40 kg) descend.
5. William (45 kg) descend tandis que Joe (40 kg) remonte.
6. Averell (95 kg) descend tandis que Jack et William (50 + 45 kg) remontent.
7. Joe (40 kg) descend.
8. William (45 kg) descend tandis que Joe (40 kg) remonte.
9. Joe (40 kg) descend.
10. Jack (50 kg) descend tandis que William (45 kg) remonte.
11. William (45 kg) descend tandis que Joe (40 kg) remonte.
12. Joe (40 kg) descend.

4. La course-poursuite

Réponse : Le shérif est certain de rattraper le hors-la-loi, en 28 jours au maximum.
Explication : Quand le shérif se met en route, il prend le chemin le plus court (l'unité est le jour de route) qui le relie à la ville où le hors-la-loi a dormi. Chaque jour de la semaine, dimanche exclu, c'est donc au pire pour le shérif le *statu quo* lorsque la distance qui sépare les deux hommes est maintenue constante (sinon, elle diminue d'une unité).
Mais le hors-la-loi ne bouge pas le dimanche, et le shérif est certain de réduire la distance d'une unité ce jour-là. Et comme au début, la distance qui sépare les deux hommes est un nombre entier d'unités, la course-poursuite a nécessairement une fin au bout d'un certain nombre de dimanches. Le cas le plus défavorable combine un départ le lundi et une distance de 4 unités (entre I et S ou N). Le shérif rattrape le hors-la-loi le 4e dimanche soir.

5. Âne à grammes

Réponse : On passe d'AVOINES à EVASION en 6 tours
AVOINES • EVOINAS • EVAINOS • EVAONIS • EVANOIS • EVASOIN • EVASION.
Explication : La permutation se décompose en deux cycles.
Le premier AOE • EOA • EAO, demande deux tours.
Le second cycle nécessite quatre tours car deux tours sont perdus à cause de la voyelle I qui est isolée : INS • ONS • NOS • SON • SIN

BARRIÈRE HÉMATO-ENCÉPHALIQUE
Le cerveau est isolé du reste de l'organisme par la barrière hémato-encéphalique (BHE), paroi des vaisseaux sanguins constituée de cellules endothéliales jointives, qui contrôle étroitement les échanges entre les compartiments sanguin et cérébral.

ULTRASONS BIOMÉDICAUX Ondes mécaniques qui engendrent des oscillations dans les milieux qu'elles traversent. Elles peuvent être utilisées à des fins diagnostiques (échographie, écho-Doppler…) ou bien thérapeutiques (destructions de tumeurs, calculs, calcifications…)

MALADIE D'ALZHEIMER Caractérisée par des troubles de la mémoire récente, une perte progressive des facultés cognitives et de l'autonomie, elle est associée à la présence dans le cerveau de plaques amyloïdes et de dégénérescences neurofibrillaires due la protéine Tau.

Alzheimer : la piste des ultrasons

Une nouvelle thérapie est à l'essai, les ultrasons. Ils ouvriraient la barrière cellulaire qui protège le cerveau pour le débarrasser des protéines toxiques liées à la maladie.

Par Elena Sender @ElenaSender

Sésame ouvre-toi ! Et si, grâce aux ultrasons, il devenait possible d'avoir accès au cerveau des patients atteints de la maladie d'Alzheimer pour le « nettoyer » des protéines toxiques impliquées dans la maladie ? Cette idée révolutionnaire fait actuellement l'objet de quelques essais cliniques à travers le monde. En France, une première étude vient de s'achever à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris. Sous la houlette du Pr Alexandre Carpentier, chef du service de neurochirurgie, dix patients atteints par cette pathologie qui aboutit à la mort progressive des neurones — et qui touche en France près de un million de personnes — ont été traités de la sorte. Pour l'instant il ne s'agit que d'une étude préliminaire (dite de phase I), afin de tester la faisabilité et la sécurité de la procédure, mais elle marque un jalon dans la course contre cette maladie qui demeure incurable, malgré l'espoir récent qu'a suscité le succès, certes modeste, d'un médicament *(lire p. 12)*.

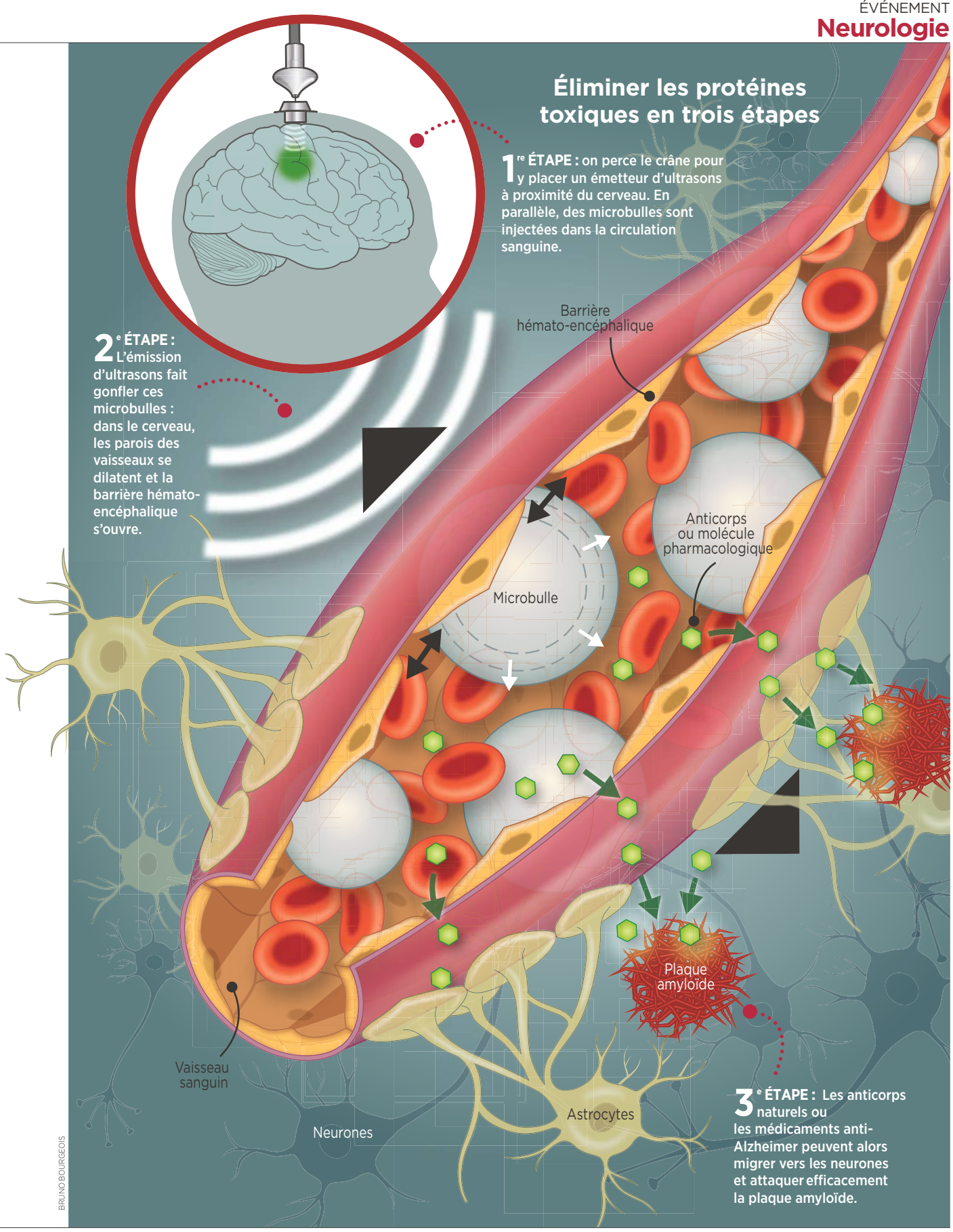
Une ouverture temporaire et réversible

Pour comprendre il faut savoir que notre cerveau est sous bonne garde, protégé par la barrière hémato-encéphalique (BHE) : une couche de cellules collées-serrées autour des vaisseaux sanguins cérébraux, qui empêche l'entrée en provenance du sang de toutes les molécules d'une taille (poids moléculaire) supérieure à 500 daltons (Da), c'est-à-dire 95 % d'entre elles. La BHE est, de surcroît, une super-nettoyeuse, débarrassant les neurones de leurs déchets, notamment les peptides amyloïdes-bêta qui, s'ils s'accumulent, s'agrègent en plaques amyloïdes, l'une des caractéristiques de la maladie d'Alzheimer. Ce serait d'ailleurs la perte d'efficacité de nettoyage de la BHE qui, avec l'âge, aboutirait à l'accumulation de ces plaques dans le cerveau. Cependant, même chez les personnes atteintes d'Alzheimer, cette barrière demeure assez étanche pour faire barrage aux médicaments. « *Seules 1 % des molécules anti-Alzheimer* [anticorps monoclonaux qui visent les protéines toxiques] *testées parviennent à traverser*, expose Alexandre Carpentier. *Ce qui expliquerait le peu de succès des essais cliniques.* » D'où l'idée d'ouvrir momentanément la BHE. Comment ? Grâce aux ultrasons selon une constatation faite dans les années 2000 dans le laboratoire de Kullervo Hynynen, un spécialiste de physique biomédicale de l'École de

-13 %
La baisse de l'incidence de la maladie d'Alzheimer en Europe et aux États-Unis en dix ans, qui touche 60 à 70 % des 50 millions de personnes atteintes de démence dans le monde. Le recul du tabagisme en serait notamment à l'origine.
(source : Neurology 2020)

A. CARPENTIER

« Seules 1 % des molécules anti-Alzheimer parviennent à traverser la barrière hémato-encéphalique »
Pr Alexandre Carpentier, chef du service de neurochirurgie de l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris


Éliminer les protéines toxiques en trois étapes
1re ÉTAPE : on perce le crâne pour y placer un émetteur d'ultrasons à proximité du cerveau. En parallèle, des microbulles sont injectées dans la circulation sanguine.
2e ÉTAPE : L'émission d'ultrasons fait gonfler ces microbulles : dans le cerveau, les parois des vaisseaux se dilatent et la barrière hémato-encéphalique s'ouvre.
Barrière hémato-encéphalique
Anticorps ou molécule pharmacologique
Microbulle
Plaque amyloïde
Vaisseau sanguin
Neurones
Astrocytes
3e ÉTAPE : Les anticorps naturels ou les médicaments anti-Alzheimer peuvent alors migrer vers les neurones et attaquer efficacement la plaque amyloïde.
BRUNO BOURGEOIS

STEPHANE DE SAKUTIN/ AFP

INTERVIEW

PR BRUNO DUBOIS

CHEF DU SERVICE DES MALADIES COGNITIVES ET COMPORTEMENTALES À L'HÔPITAL DE LA PITIÉ-SALPÊTRIÈRE À PARIS, AUTEUR D' « ALZHEIMER LA VÉRITÉ SUR LA MALADIE DU SIÈCLE » (GRASSET)

« La définition de la maladie doit être débattue »

Le laboratoire américain Biogen a demandé une autorisation de mise sur le marché pour l'aducanumab, son médicament anti-Alzheimer. Disposera-t-on enfin d'un traitement en 2021 ?

Biogen a présenté deux études sur l'aducanumab dans le traitement précoce d'Alzheimer L'une — où plus de patients avaient reçu la dose maximale — a eu un résultat positif (22 % de ralentissement du déclin cognitif). L'autre était négative. On ne peut préjuger de la réponse de la FDA (l'agence du médicament américaine) mais si elle donne son accord sur la base d'une seule étude positive, au lieu de deux requises, ne prend-elle pas le risque de baisser les standards de validation ? Cela dit, cet essai positif redonne de l'espoir après l'échec de 413 essais cliniques ces vingt dernières années.

Cet essai positif valide-t-il enfin l'hypothèse dite amyloïde de la maladie ?

L'aducanumab vise le peptide amyloïde-bêta. Ce résultat étaye donc, pour la première fois, l'hypothèse amyloïde qui suppose que la maladie résulte d'une cascade biologique impliquant le peptide amyloïde-bêta mal replié, agrégé en plaques. Sa présence dans le cerveau propagerait une dégénérescence neurofibrillaire due à la protéine tau. Il existe cependant une autre hypothèse : l'amyloïde et tau ne seraient que des facteurs de risque.

S'il ne s'agit que de facteurs de risque, quand dire qu'une personne est malade ?

C'est toute la question ! Outre-Atlantique, les scientifiques penchent pour une définition purement biologique : est malade qui est porteur de biomarqueurs (peptide amyloïde, tau...), même sans symptômes. Cet état préclinique est très étudié à des fins de recherche mais peut-on admettre cette définition en routine clinique ? Je réponds non. Il est éthiquement irrecevable d'annoncer à quelqu'un sans symptômes qu'il a la maladie d'Alzheimer. Cette définition doit être débattue, avant que ne soient disponibles des examens sanguins de routine. **Propos recueillis par E. S.**

médecine de Harvard à Cambridge (États-Unis), aujourd'hui à l'institut Sunnybrook (Canada). Tout réside dans l'émission pulsée des ultrasons (au lieu d'une émission en continu en imagerie échographique) : ces ultrasons émis par une sonde placée sur le crâne (technique dite HIFU) font vibrer les agents de contrastes échographiques habituels (microbulles gazeuses de dix micromètres de diamètre) injectés de façon synchrone dans la circulation sanguine. « *Les microbulles entrent en résonance, exerçant sur la paroi des capillaires un léger stress viscoélastique qui crée une ouverture temporaire et réversible de la BHE* », explique Alexandre Carpentier. Les premières expériences chez l'animal sont sans appel : des molécules mesurant jusqu'à 2000 kDa parviennent à passer.

S'inspirant de ces résultats, le chercheur français a conçu un tout autre dispositif (technique Sonocloud), directement implanté dans la calotte osseuse du sujet. « *Le crâne absorbe 80 % de l'énergie émise*, précise-t-il. *Avec un émetteur interne, en contact avec les méninges* [tissu qui recouvre le cerveau], *on décuple l'efficacité des ultrasons qui parviennent au cerveau.* » Et le professeur de faire un petit calcul : « *Avec l'HIFU externe, quatre heures de traitement sont nécessaires pour ouvrir de 1 à 4 cm³ de BHE* » ce qui peut être bon pour envoyer des traitements dans des zones très localisées comme les noyaux gris centraux impliqués dans la maladie de Parkinson. « *Alors qu'il suffit de sept minutes pour ouvrir jusqu'à 45 cm³ de barrière pendant les six heures suivantes avec l'émetteur implanté ! De quoi ouvrir une zone pertinente pour des pathologies diffuses comme Alzheimer ou le glioblastome (tumeur cérébrale).* » Dans le cas de cette dernière, la procédure a été testée chez l'humain dès 2015, permettant de faire pénétrer « *quatre à cinq fois plus d'agents chimiothérapeutiques dans le cerveau* », selon l'expert. Les premiers résultats, sur 25 patients, ont été publiés dans la revue *Science* : la survie, habituellement de huit mois, a été portée à douze mois, en bonnes conditions. « *Ce n'est évidemment pas assez mais c'est un signal qu'une amélioration est possible* », assure Alexandre Carpentier.

> L'émetteur interne, en contact avec les méninges, permet de multiplier par dix l'efficacité des ultrasons qui arrivent jusqu'au cerveau

Efficace... même sans anticorps monoclonaux

Et pour la maladie d'Alzheimer ? Une équipe de l'Institut du cerveau de l'université du Queensland (Australie), menée par le biologiste Jürgen Götz, fait une découverte stupéfiante en 2015. La procédure HIFU est efficace même sans ajout d'anticorps monoclonaux. Les plaques amyloïdes sont en effet réduites chez 75 % chez les souris ainsi traitées. Mieux ! leurs performances de mémoire spatiale et de reconnaissance en sont améliorées. « *Nos résultats suggèrent que les ultrasons répétés sont utiles pour éliminer le peptide amyloïde-bêta dans le cerveau de la souris sans dommages manifestes. Le potentiel thérapeutique de cette méthode non invasive devrait être exploré plus avant dans la maladie d'Alzheimer* », concluent alors les auteurs. Comment expliquer ce phénomène ? « *Lorsque la BHE est ouverte, elle laisse passer des anticorps endogènes (produits par*

Inserm
La science pour la santé
From science to health

cité sciences et industrie

CYCLE DE CONFÉRENCES

Santé en questions

Le cerveau, fabrique de nos émotions

Jeudi 24 septembre 2020 de 19h à 20h30

Joie, surprise, tristesse, colère… ces émotions ultra-familières nous sont indispensables pour nous adapter au monde qui nous entoure. Elles entretiennent un dialogue avec notre corps, notre cerveau et notre environnement. Elles ont un rôle de protection et sont nécessaires à notre existence, à notre survie.

Auditorium de la Cité des sciences et de l'industrie à Paris

INTERVENANTS

- **Philippe Fossati**

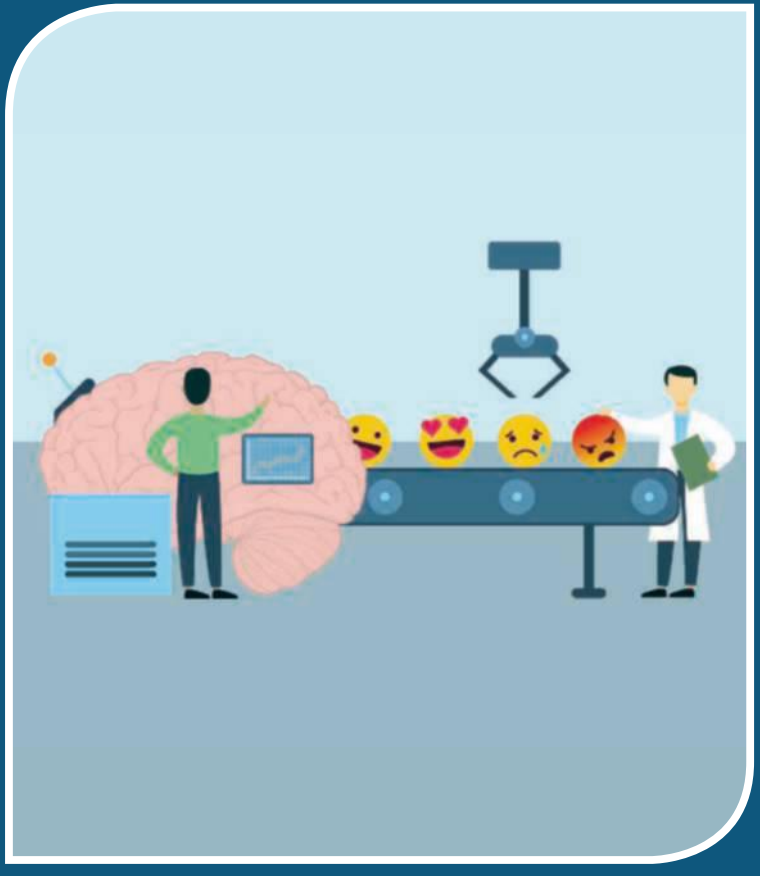
Psychiatre, chercheur à l'Institut du cerveau et de la moelle épinière (unité 1127 Inserm, Paris)

- **Denis Peschanski**

Directeur de recherche CNRS, historien, Centre européen de sociologie et de science politique (CNRS/Université Paris 1/EHESS), co-responsable scientifique du programme 13-Novembre (Inserm/CNRS/HESAM)

- **Carine Dautrey**

Psychologue spécialiste en psychologie comportementale et cognitive, Association Française de Thérapie Comportementale et Cognitive



inserm.fr et cite-sciences.fr

La Recherche · SCIENCES AVENIR · THE CONVERSATION · casden · PARIS · la grande fête des sciences

LIEUX DE VIE

Le Village landais Alzheimer, un établissement pilote

Améliorer le bien-être des malades d'Alzheimer, de leurs proches et des soignants sans médicament, tel est l'enjeu du Village landais Alzheimer, un projet pilote d'établissement spécialisé, qui a ouvert ses portes ce printemps à Dax (Landes). Installés dans 16 maisons sur cinq hectares de verdure, 120 malades d'Alzheimer vont y bénéficier d'un accompagnement personnalisé, *« comme à la maison »* : une liberté totale de mouvements et un rythme quotidien adapté à chacun. Et la possibilité de se mélanger à la population, le village étant doté d'un auditorium, d'une médiathèque, d'un salon de coiffure et d'un restaurant, ouvert au public. Pourquoi de telles mesures ? *« Dans les six mois qui suivent l'entrée en institution "classique", se produit une dégradation sur le plan fonctionnel cognitif et sur celui de la santé en général »*, souligne Hélène Amieva, professeure de psychogérontologie à l'université de Bordeaux-II et chercheuse Inserm. En cause : la rupture trop brutale avec la routine qui, pour les malades, permet de continuer à fonctionner, étant donné le peu de ressources cérébrales qu'il leur reste pour s'adapter aux changements. *« L'intérêt du village est donc d'essayer de mimer au maximum la vie quotidienne telle qu'elle était avant »*, précise la chercheuse. Autre originalité, son équipe est installée à demeure pour cinq ans afin d'évaluer le projet car il faut savoir si ces initiatives sont davantage adaptées ou non que les Ehpad classiques ». Il s'agira ainsi de quantifier la qualité de vie et la participation sociale des résidents, et les comparer à celles d'un Ehpad traditionnel du département. *« Nous examinerons également la capacité fonctionnelle (actes de la vie quotidienne), la mobilité, les fonctions cognitives et les troubles du comportement des résidents, ainsi que leur consommation de soins (médicaments et visites médicales) »*, précise la professeure. Enfin, le rapport coût/efficacité sera étudié *« afin d'en démontrer la viabilité économique »*. Pour l'heure, l'accueil coûte 65,42 euros par jour (hébergement et soins) pris en charge par les aides. L'équivalent des tarifs habituellement pratiqués dans les Ehpad publics de la région.

SÉBASTIEN ZAMBON/VILLAGE LANDAIS

Le site comprend un restaurant et un auditorium ouverts à tous, pour que malades et population se côtoient.

l'organisme) de 150 à 200 kDa, souligne Alexandre Carpentier. *Ils adhèrent alors aux plaques amyloïdes, ce qui active les cellules "nettoyeuses" du cerveau (microgliales), qui les éliminent.* » Hypothèse complémentaire : *« l'albumine (60 kDa) — qui passe aussi — se lie aux plaques amyloïdes et facilite cette élimination »*.
Reste à vérifier si cela fonctionne chez l'humain, sans effets délétères. En 2018, l'équipe de Sunnybrook a ainsi publié le premier essai de phase I de HIFU externe, sur cinq patients, sans effet secondaire. La phase II sur 30 patients est en cours. En France, depuis 2017, dix patients Alzheimer du Pr Bruno Dubois *(lire l'interview p. 12)* et du Dr Stéphane Epelbaum ont été équipés d'un implant Sonocloud et ont bénéficié de sept séances à 15 jours d'intervalle pour un résultat attendu, en octobre prochain. *« Nous savons déjà que la méthode est non toxique*, assure le Pr Carpentier. *Il faudra davantage de séances pour gagner en efficacité.* » Deux émetteurs invisibles pourraient aussi être implantés de chaque côté du crâne, pour cibler les hippocampes et les cortex temporaux du cerveau, touchés dans la maladie d'Alzheimer. Si Alexandre Carpentier trouve le financement pour cette future étude, des résultats pourraient tomber dans deux ans. ■

Pour la rentrée, quoi d'autre ?

orange™

Soit pour les nouveaux clients Orange :
remises immédiates de 14 €/mois(1) et remboursements différés de 5 €/mois pour internet avec changement d'opérateur et de 15 €/mois pour le mobile(2).

Prenez rendez-vous en boutique :
orange.fr, appli Orange et moi, 0 800 02 55 55 (appel et service gratuits).

Offre soumise à conditions du 20 août au 7 octobre 2020, pour toute première souscription d'une offre de la gamme Open, réservée aux particuliers en France métropolitaine, valable sous réserve d'éligibilité et raccordement à la Fibre, sur réseaux et terminaux compatibles. Engagement 12 mois. Frais d'activation du décodeur : 40 €. TV UHD 4K : avec contenus et matériel compatibles. **(1)** Remises immédiates de 9 €/mois le Bon Plan et de 5 €/mois la remise La Fibre au prix de l'ADSL. **(2)** Remboursements différés sur facture de 5 €/mois pour les nouveaux clients internet avec changement d'opérateur après le 20/06/2020, et 15 €/mois pour le mobile. Détail et formulaires sur odr.orange.fr

À Beyrouth, la répétition d'un scénario trop bien connu

L'explosion de 2750 tonnes de nitrate d'ammonium a fait plus de 220 morts. Les conséquences sanitaires pour les milliers de blessés sont délicates à évaluer.

FADEL ITANI / NURPHOTO / AFP

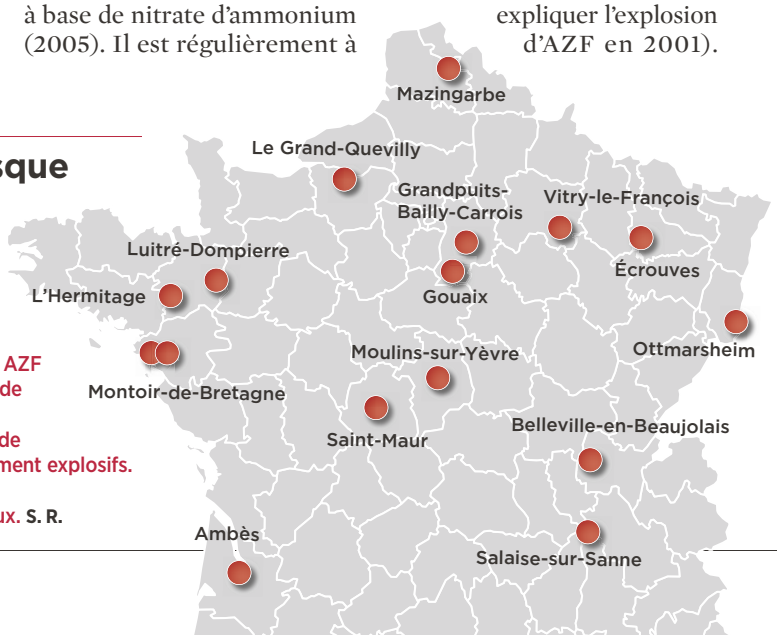
La zone portuaire après l'explosion survenue le 4 août qui a dévasté une grande partie de la capitale libanaise.

Il était environ 18 heures mardi 4 août 2020 à Beyrouth (Liban) lorsque deux énormes explosions se sont produites dans le port de la ville. « *Près de la moitié de la capitale est détruite ou endommagée* », a déploré le gouverneur. Le souffle a parcouru plus d'une dizaine de kilomètres. L'Institut américain de géophysique a fait savoir que ses capteurs avaient associé l'explosion à un séisme de magnitude 3,3. À l'origine du drame : 2750 tonnes de nitrate d'ammonium gardées depuis six ans dans le hangar 12 du port de la ville. « *Ce produit sert à la fabrication de fertilisants, d'engrais et d'explosifs* », explique Marie-Astrid Soenen, responsable du pôle Substances, produits et procédés à la Direction des risques accidentels de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), auteure d'un rapport sur les engrais solides à base de nitrate d'ammonium (2005). Il est régulièrement à l'origine d'accidents comme, en France, l'explosion en 2001 dans l'usine AZF à Toulouse. En soi, le nitrate d'ammonium est stable, à condition de ne pas être stocké à proximité d'une source de chaleur, et de ne pas être mélangé avec des produits susceptibles d'amorcer une réaction chimique comme des substances chlorées (l'hypothèse retenue par la cour d'appel de Toulouse pour expliquer l'explosion d'AZF en 2001).

DIRECTIVE SEVESO

En France, 16 sites à très grand risque

La France consomme annuellement 8 % de la production mondiale de nitrate d'ammonium. Les lieux de stockage de plus de 100 tonnes de ce composé chimique sont référencés et classés selon leur importance. On dénombre ainsi 16 entrepôts dits Seveso haut (très grand risque d'accident majeur), en stockant plus de 5000 tonnes *(carte ci-contre)* et 31 sites Seveso bas (plus de 1250 tonnes). L'explosion de l'usine AZF à Toulouse en 2001, qui n'a impliqué « que » 300 à 400 tonnes de nitrate d'ammonium, n'entre pas dans ces catégories. Avec les réserves des exploitants agricoles et autres ainsi que les stocks de 100 à 1250 tonnes, des milliers de dépôts sont donc potentiellement explosifs. Et cette classification ne tient pas compte de la proximité du lieu de stockage avec un autre site potentiellement dangereux. **S. R.**



BRUNO BOURGEOIS

PHOTOS : EUROPEAN SPACE IMAGING/COVER IMA/SIPA

Les quais et les docks vus par le satellite WorldView-2 de l'Esa avant l'explosion du hangar 12 (flèche) qui a laissé un cratère de 43 m de profondeur.

« L'accidentologie nous dit qu'il y a très souvent un incendie à l'origine des explosions au nitrate d'ammonium, ce qui semble être le cas ici aussi », précise Marie-Astrid Soenen.

À Beyrouth, le bilan humain est lourd : plus de 220 personnes ont perdu la vie et plus de 6500 ont été blessées. Et les trois principaux hôpitaux de la ville comme de nombreuses cliniques ont été détruits. L'exposition au nitrate d'ammonium aura-t-elle d'autres conséquences sanitaires ? *« L'impact sera surtout dû à l'onde de choc plus qu'à la pollution*, estime Marie-Astrid Soenen. *Le nuage très chaud qui s'est élevé a vite été brassé par l'air. Il faut avoir été à proximité pour subir la toxicité des produits de décomposition du nitrate d'ammonium [dioxyde d'azote, acide chlorhydrique, chlore...]. Cependant, il arrive parfois que la détonation mette en suspension d'autres produits chimiques présents qui — eux — peuvent avoir une toxicité. »* Trop tôt pour le savoir. Dans l'urgence, les médecins sont confrontés à des traumatismes physiques. Une classification de l'Institut de recherche médicale de défense chimique de l'armée américaine (USAMRICD) les a regroupés en 4 types. D'abord les lésions primaires, directement dues à l'impact de l'onde de choc, les organes les plus vulnérables étant ceux qui se sont remplis de gaz (oreilles, larynx, poumons, intestins), tous susceptibles de rompre sous l'effet de la pression ; les lésions secondaires, infligées par les débris projetés ; les lésions tertiaires, quand les victimes ont été projetées sur des obstacles (fractures, traumatismes crâniens...) ; enfin, les brûlures et autres lésions. Impossible de comptabiliser pour le moment à quel type de blessures les médecins ont surtout affaire. L'expérience, notamment toulousaine, a établi que ce genre d'explosions induit des conséquences sanitaires à long terme : dépressions, maladies cardio-vasculaires ou troubles de l'audition. Encore faut-il que soit assuré un suivi des populations pour les identifier et les prendre en charge. Au moment où nous écrivons ces lignes, aucune information précise sur ce sujet n'a été donnée. ■

Marine Benoit, Héloïse Chapuis et Mathieu Nowak

IMAGERIE

Les satellites guident les secours

Dès le lendemain de l'explosion, une vingtaine de satellites ont été pointés vers Beyrouth à l'initiative du Cnes (Centre national d'études spatiales) français, afin de fournir des données satellitaires et cartographier les zones sinistrées — outils essentiels pour les opérations de secours, puis pour repérer les groupements de population et organiser les ravitaillements. Ce dispositif actionné lors de catastrophes, naturelles ou non, est prévu depuis 2000 par la charte « Espace et catastrophes majeures » qui mobilise gratuitement et pour le monde entier les technologies spatiales de 17 pays, soit potentiellement plus de 40 satellites. Il fournit aussi des images d'archives afin d'évaluer les dégâts en comparant les images prises avant et après événement. Sylvie Rouat

TROIS PRÉCÉDENTS

1947 : à Texas City (États-Unis), l'explosion du navire *Grandcamp* chargé de 2300 t de nitrate fait 580 morts.

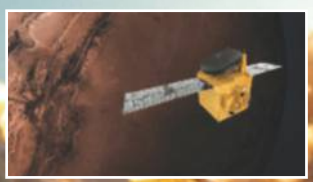
1947 : à Brest (Finistère), l'explosion de 3133 t de nitrate à bord de l'*Ocean Liberty* fait 26 morts.

2001 : À Toulouse (Haute-Garonne), l'usine AZF est détruite par l'explosion de 300 à 400 t de nitrate tuant 31 personnes.

Le rover Perseverance.

Le petit hélicoptère Ingenuity.

La mission chinoise Tianwen-1.



La sonde Hope des Émirats arabes unis (vue d'artiste).

Cap sur Mars

Trois missions ont réussi leur décollage en juillet à destination de la planète Rouge.

La mission Mars 2020 s'est envolée le 30 juillet de cap Canaveral (États-Unis) avec à son bord le rover Perseverance et l'hélicopère Ingenuity.

UNITED LAUNCH ALLIANCE - NASA - AFP - MBRSC

ESPACE Plein succès pour les trois sondes qui devaient partir pour la planète Mars *(lire* S. et A. *n° 881, juillet 20200)*. Le décollage a été réussi pour l'américaine Mars 2020, la chinoise Tianwen-1 et l'émiratie Al-Amal. C'est cette dernière qui a ouvert le bal le 19 juillet en s'envolant depuis le centre spatial japonais de Tanegashima. Après un voyage de sept mois, la sonde Hope se mettra en orbite autour de Mars afin d'étudier son atmosphère et son climat. Le 23, Tianwen-1 a été lancée à son tour depuis le centre spatial chinois de Wenchang. Cette mission prévoit de placer en orbite une sonde et de poser sur le sol martien un atterrisseur et un astromobile bardé de caméras et de capteurs. Soit en une seule fois presque autant que ce que les missions martiennes de la Nasa ont réalisé depuis les années 1960 ! Enfin, le 30 juillet, la mission Mars 2020 a clos la caravane. Elle emporte le gros rover Perseverance chargé de rechercher des signes de vie fossiles et de collecter des échantillons de roches pour un retour ultérieur sur Terre. Le petit hélicoptère Ingenuity est du voyage, ainsi que des éléments de combinaisons spatiales qui seront testées à bord du rover. **S. R.**

Un ballon stratosphérique pour étudier les étoiles

ASTRONOMIE La Nasa prévoit d'envoyer un télescope dans la stratosphère à l'aide d'un ballon de la taille d'un stade de football. Il partirait fin 2023 de l'Antarctique pour atteindre 40 km d'altitude. Avec son antenne parabolique de 2,5 m de diamètre, Asthros détectera la lumière infrarouge lointaine pour analyser le mouvement et la vitesse des gaz autour de jeunes étoiles pour mieux comprendre comment elles se sont formées. **S. R.**

Le télescope emmené par un énorme ballon (vue d'artiste).

NASA

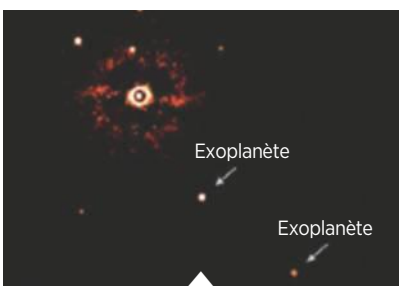
16 Le nombre d'atomes qui forment le plus petit moteur au monde

NANOTECHNOLOGIE C'est un « moteur moléculaire », une macromolécule de moins d'un nanomètre qui, alimentée en énergie thermique et électrique, tourne dans un seul sens. Elle présente même d'étranges propriétés quantiques que les scientifiques ne parviennent pas à expliquer. **M. B.** SOURCE : S. STOLZ, LABORATOIRE FÉDÉRAL D'ESSAI DES MATÉRIAUX ET DE RECHERCHE, DÜBENDORF, SUISSE.

L'IMAGE

Voici la première photographie d'un système planétaire autour d'une étoile semblable au Soleil

ASTRONOMIE Ce cliché a été obtenu au Very Large Telescope (VLT) de l'Observatoire européen austral (ESO), construit dans le désert chilien de l'Atacama. L'étoile, TYC 8998-760-1, située à environ 300 années-lumière de la Terre, a une masse et une température proches de celles de notre Soleil. Pour l'heure, les astronomes ont identifié deux exoplanètes autour d'elle, mais il pourrait y en avoir davantage. **M. B.**



L'étoile TY 8998-760-1 et ses deux exoplanètes saisies par le VLT de l'ESO.

ESO/BOHNET AL.

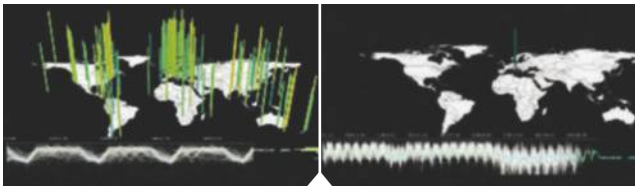
La Russie teste un satellite armé

DÉFENSE La Russie a testé le 15 juillet une arme orbitale affirme l'US Space Force, la branche des forces armées américaines créée en 2019 pour les opérations militaires dans l'espace. Le satellite Cosmos 2543 a en effet lancé à 200 m/s un projectile capable de détruire un autre satellite. Cosmos 2543 était déjà connu des militaires américains pour avoir approché un de leurs satellites espions en février. **S. R.**

Première détection de débris spatiaux en pleine journée

ESPACE Des astronomes autrichiens ont développé une méthode pour traquer les débris spatiaux durant 22 heures par jour, alors que ce n'est possible qu'à l'aube et au crépuscule aujourd'hui. Elle marie un télescope à large spectre, un puissant laser et un logiciel de détection pour corriger les erreurs dues aux perturbations atmosphériques. **H. Ru.**

SOURCE : MICHAEL STEINDORFER, ACADÉMIE AUTRICHIENNE DES SCIENCES, GRAZ, AUTRICHE.



THOMAS LECOCQ ET AL.

Les vibrations de haute fréquence captées par 268 sismographes dans le monde le 25 novembre 2019 (à gauche) et le 6 juin 2020 (à droite).

Les Terriens confinés, la Terre vibre moins

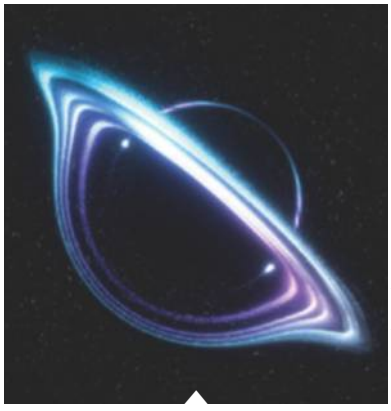
SISMOLOGIE Entre mars et mai, le bruit sismique a chuté de 50 %, voire plus. C'est le constat de chercheurs de 27 pays à partir des données de 268 sismographes à travers le monde. Il reflète la réduction, pendant le confinement, du fonctionnement des usines et des déplacements, qui produisent des vibrations continues en plus des mouvements propres du sol. **A. D.**

SOURCE : THOMAS LECOQ, OBSERVATOIRE ROYAL DE BELGIQUE.

Mystérieuse onde gravitationnelle

ASTROPHYSIQUE
Les scientifiques ne parviennent pas à comprendre quel objet a fusionné avec un trou noir pour donner naissance à l'onde gravitationnelle GW190814, observée en août 2019. Sa masse apparaît trop grande pour en faire une étoile à neutrons et trop faible pour un trou noir : 2,6 fois la masse solaire, une valeur jamais encore répertoriée pour un astre connu ! **A. Kh.**

SOURCE : R. ABBOTT, LIGO, CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ÉTATS-UNIS.



ALEX ANDRIX / VIRGO / EGO

GW190814 serait issue de la fusion d'un trou noir et d'un objet inclassable (vue d'artiste).

TWITTER / THOMAS PESQUET

L'astronaute français affiche sur son compte Twitter son envol l'an prochain à bord de Crew Dragon.

Thomas Pesquet va retourner dans l'espace

Il sera le premier Européen à rejoindre l'ISS avec le vaisseau américain baptisé Endeavour.

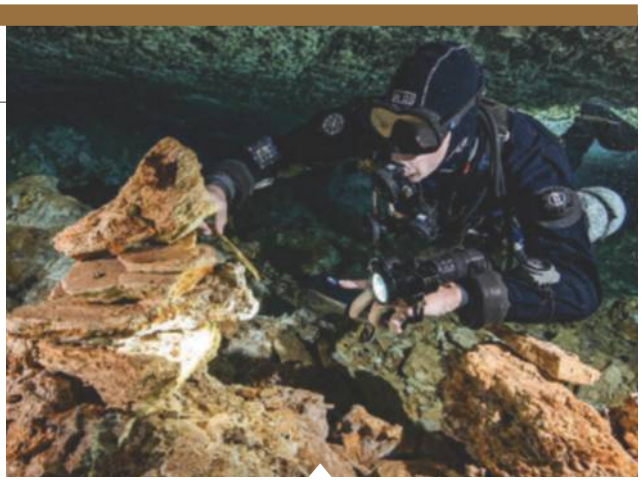
ASTRONAUTIQUE
Au printemps 2021, l'astronaute français Thomas Pesquet s'envolera à bord de la capsule privée Crew Dragon de l'entreprise américaine SpaceX pour rejoindre une seconde fois la Station spatiale internationale (ISS). Il devrait effectuer ce vol à bord d'Endeavour, la même navette que celle qui a consacré le retour au vol habité des États-Unis depuis leur propre sol. Lancée le 30 mai et revenue sans encombre le 2 août avec son équipage, la mission effectuait le premier vol habité américain depuis le retrait des navettes spatiales en 2011. La Nasa a en effet autorisé en juin la réutilisation des Crew Dragon pour les vols vers l'ISS, SpaceX ayant fait la démonstration que le vaisseau cargo Dragon — dont est dérivé Crew Dragon — supporte au moins trois à cinq réutilisations. Thomas Pesquet sera le premier Européen à rejoindre l'ISS avec un vaisseau américain depuis Roberto Vittori en 2011. **S. R.**

AFP

La capsule Crew Dragon de SpaceX.

La plus ancienne trace d'activité humaine en Amérique

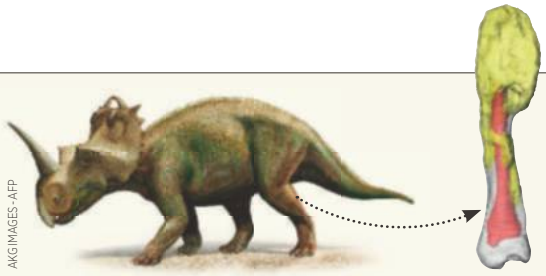
Il y a 12 000 ans, des hommes extrayaient de l'ocre rouge dans la grotte aujourd'hui noyée de Sac Actun, au Mexique.



CINDAQ.ORG

Des repères avaient été laissés par les humains pour pouvoir se retrouver dans l'immense réseau souterrain

PRÉHISTOIRE Outils pour creuser, fosses à feu et traces de suie au plafond, repères de navigation : ce sont les plus anciennes preuves de l'activité des premiers humains ayant peuplé le continent américain, il y a au moins 12 000 ans. Elles viennent d'être découvertes à Sac Actun, un vaste réseau de grottes sous-marines situé dans la péninsule mexicaine du Yucatán. Là même où avait été mis au jour Naia en 2007, le plus vieux squelette humain jamais trouvé sur le continent américain, daté de -13 000 ans. Les plongeurs spéléologues du Centre de recherche du système aquifère de Quintana Roo (Cindaq), à l'origine de cette découverte, estiment que ces premiers Américains extrayaient de l'ocre rouge, utilisée comme pigment, dans cette partie de la grotte, nommée désormais Mina Roja. Ce qui expliquerait la présence de Naia et d'autres ossements humains dans ce lieu difficile d'accès et qui fut inondé il y a 8000 ans. La carrière d'ocre de Sac Actun devient ainsi la plus ancienne connue en Amérique et la première de la période paléo-indienne. **M. B.**



AKG IMAGES - AFP

Un des os (à droite) porte la marque d'une tumeur (en vert).

Le premier cas de cancer agressif des os au monde

PALÉONTOLOGIE Un dinosaure à cornes *Centrosaurus apertus (vue d'artiste à gauche)* vieux de 75 à 77 millions d'années découvert au Canada était atteint d'une tumeur osseuse agressive : un ostéosarcome. C'est ce que montrent des scanners et l'observation au microscope de fines sections du tissu osseux fossilisé *(photo à droite)*. Un premier exemple de ce qui est aujourd'hui le plus fréquent des cancers osseux chez les adolescents et les jeunes adultes. **R. M.**

SOURCE : SEPER EKHTIARI, UNIVERSITÉ MCMASTER, CANADA.

101,5 Ma

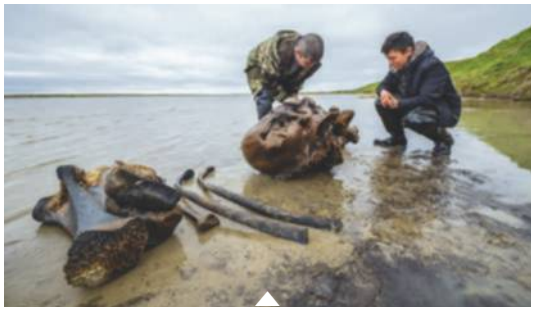
L'âge de bactéries « réanimées » en laboratoire

GÉOMICROBIOLOGIE
Ce seraient les plus vieux organismes jamais retrouvés sur Terre. Ces bactéries ont été prélevées dans des sédiments du Pacifique Sud, à 75 m sous le fond de l'océan. En leur injectant des nutriments, les chercheurs ont réussi à obtenir une concentration de plus de 1 million de bactéries par cm^3 après 65 jours, contre à peine un millier au départ. M. B.

SOURCE : YUKI MORONO, JAMSTEC, NANKOKU, JAPON.

Un mammouth extraordinairement bien conservé

PALÉONTOLOGIE Tendons, peau, tissus mous, poils… Les restes étonnamment bien conservés d'un mammouth laineux vieux de 10 000 ans ont été extraits du pergélisol dans la péninsule de Yamal, près du village de Seyakha, en Sibérie. Après deux expéditions de terrain, les paléontologues russes sont parvenus à récupérer 90 % du corps du géant du pléistocène. Des coprolithes (excréments fossilisés) découverts à proximité livreront aussi des informations sur son régime alimentaire. **B. A.**



SPUTNIK/SIPA

90 % du corps du mammouth vieux de 10 000 ans a pu être extrait du lac Pechevalavato (Sibérie).

Là où le coq fut domestiqué

NÉOLITHIQUE
La zone géographique où le coq et la poule (*Gallus gallus domesticus*) furent domestiqués se précise : l'analyse de 863 génomes de ces gallinacés révèle que le volatile est issu de la sous-espèce *Gallus gallus spadiceus*, dont la distribution actuelle couvre le sud-ouest de la Chine, le nord de la Thaïlande et la Birmanie. **B. A.**

SOURCE : MING-SHAN WANG, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE, SANTA CRUZ, ÉTATS-UNIS.

CIEL DÉGAGÉ SUR LE FUTUR

Terre d'innovation et de recherche de pointe, le Grand Est compte 12 000 chercheurs, 5 prix Nobel, un IHU et de nombreux laboratoires de renommée internationale.

© Getty images

Grand Est
ALSACE CHAMPAGNE-ARDENNE LORRAINE

grandest.fr

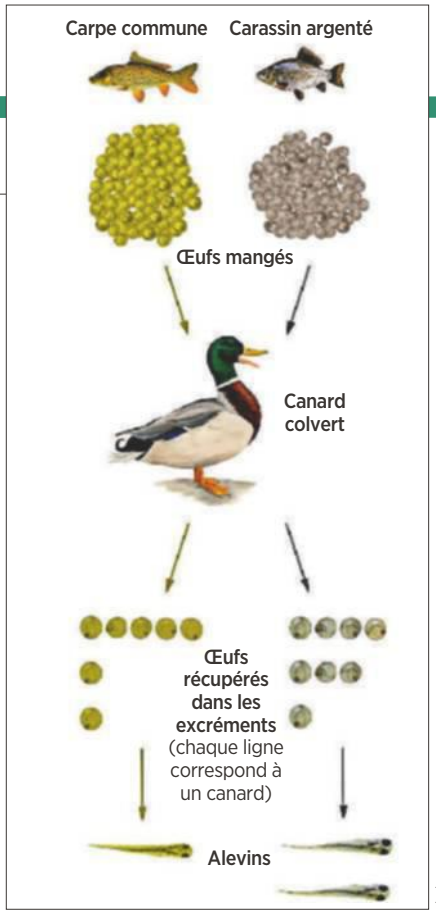
Le soleil se lève à l'Est

Comment les poissons peuplent les lacs isolés

Des œufs de poissons ingérés puis excrétés vivants par des oiseaux expliqueraient leur présence dans des étendues d'eau reculées.

ÉCOLOGIE Même des lacs isolés au fond de cratères, en altitude ou dans le Grand Nord contiennent souvent des poissons : le mystère de leur apparition dans ces endroits reculés vient d'être élucidé par des chercheurs hongrois. La piste des oiseaux était suspectée depuis plus d'un siècle mais aucune étude n'avait réussi à montrer que leurs pattes ou leurs plumes pouvaient transporter des œufs de poisson. Aussi des chercheurs du Danube Research Institute, à Debrecen, se sont-ils penchés sur un autre mode de dissémination, déjà connu chez le canard pour les graines : *via* le tube digestif et les excréments. Ils ont découvert que lorsque ces oiseaux ingèrent des œufs de carpe, une petite partie de ceux-ci (0,2 %) se retrouvent intacts dans les déjections des volatiles une heure plus tard ! Une découverte surprenante car les œufs de carpe semblent n'avoir aucune protection particulière pour résister à un passage dans un tube digestif.

Les oiseaux aquatiques tels que les colverts, très mobiles et friands d'œufs de poissons, pourraient donc bien être les premiers responsables de la dissémination des poissons dans les eaux douces isolées de la planète. **P. K.**



ADAM LOVAS-KISS ET AL.

Une petite quantité d'œufs mangés par les canards survit à la digestion et peut éclore après expulsion.

Des poissons « ultranoirs » absorbent toute lumière pour devenir invisibles

ICHTYOLOGIE 99,95 % : voilà la part de la lumière absorbée par la peau de certains poissons évoluant dans les abysses.
Une équipe dirigée par Karen Osborn, zoologiste au Musée national d'histoire naturelle américain, en a étudié 16 pour comprendre comment, même en plein jour, ces créatures gardent l'apparence d'une silhouette aux traits indiscernables. Leur noirceur est en fait due à un agencement unique d'un pigment biologique très courant, la mélanine. **M. B.**

KAREN OSBORN, SMITHSONIAN INSTITUTION

La noirceur d'« Anoplogaster cornuta » résulte de l'agencement de la mélanine de sa peau.

DAVIDE A. IURINO/UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PERUGIA/AFP

« Crocodylus checchiai » a traversé l'océan (vue d'artiste).

Les crocodiles américains sont venus d'Afrique

HERPÉTOLOGIE L'origine africaine des quatre espèces de crocodiles américains vient d'être confirmée par la découverte, en Libye, du fossile d'un ancêtre commun. Daté de 7 millions d'années et proche du crocodile du Nil, il témoigne d'une colonisation relativement récente (il y a peut-être 5 à 7 millions d'années) après une migration à travers l'Atlantique grâce à de forts courants. **P. K.**

11 Le nombre de colonies de manchots empereurs découvertes en Antarctique

ORNITHOLOGIE C'est à partir des images satellite de la mission Copernicus Sentinel-2 de l'Agence spatiale européenne que des chercheurs britanniques ont repéré ces colonies qui comptent pour 20 % de toutes celles connues ! Ce qui porte la population totale de cette espèce menacée par la fonte des glaces à un peu plus d'un demi-million d'individus. **H. J.**

SOURCE : PETER FRETWELL, BRITISH ANTARCTIC SURVEY, ROYAUME-UNI.

Combat de lézards en montagne

BIODIVERSITÉ Endémique des Pyrénées, le lézard de Bonnal se voit menacé alors qu'il vivait tranquillement au-dessus de 1800 m. Le très commun lézard des murailles a en effet grimpé de plus de 80 mètres en altitude en deux ans, à la recherche de fraîcheur. Les scientifiques du programme néo-aquitain « les sentinelles du climat », qui viennent de publier leurs dernières mesures, craignent aujourd'hui que l'espèce rare ne soit remplacée par sa cousine. **L. C.**

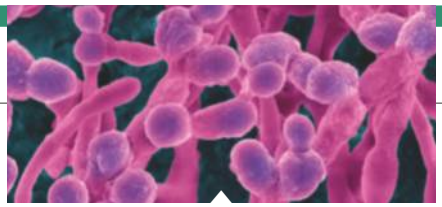
BENNY TRAPP-CC BY 3.0

Le lézard de Bonnal est une espèce endémique des Pyrénées.

700 km

La taille du plus grand éclair jamais identifié

MÉTÉOROLOGIE Il a illuminé le ciel brésilien le 31 octobre 2018, mais ce n'est que cet été que l'Organisation météorologique mondiale a annoncé que cet éclair avait pulvérisé le précédent record, qui était de 321 km. Il n'a pas été observé depuis le sol, mais identifié avec de nouvelles technologies d'imagerie satellitaire. **M. N.**



SPL

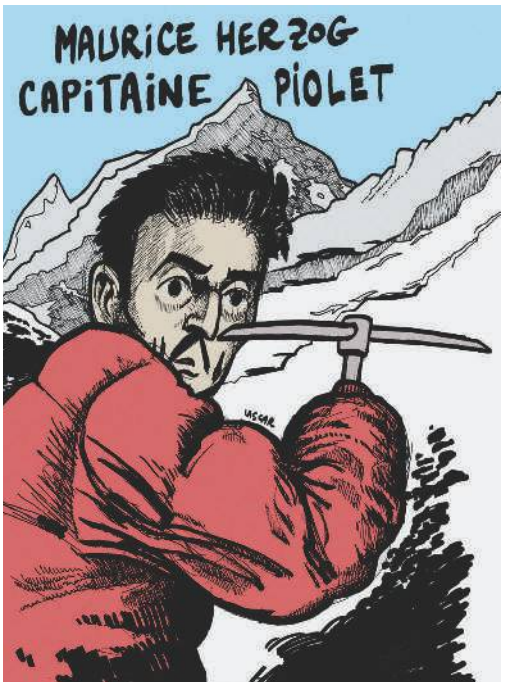
« C. sphaerospermum » vu au microscope.

Des champignons protègent des radiations dans l'espace

NUCLÉAIRE Un champignon résistant aux radiations découvert dans le réacteur nucléaire éventré de Tchernobyl pourrait protéger les astronautes lors de futures missions spatiales. C'est ce qu'avancent deux étudiants américains après avoir envoyé des *Cladosporium sphaerospermum* dans la station Spatiale internationale. Une couche de 1,7 mm d'épaisseur a suffi pour réduire les radiations de 2 %. De quoi imaginer une protection efficace avec davantage de champignons ! **M.B.**

SOURCE : GRAHAM SHUNK ÉCOLE DES SCIENCES ET DES MATHÉMATIQUES DE CAROLINE DU NORD, ÉTATS-UNIS.

L'œil de Lascar

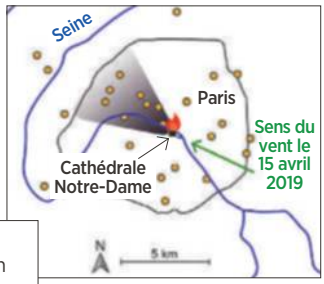


ANNAPURNA L'ascension du premier sommet de 8000 m fut accomplie en 1950. Une terrible épopée dans l'Himalaya puisque le chef de l'expédition Maurice Herzog et son compagnon de cordée Louis Lachenal y perdront doigts et orteils pour le premier, orteils pour le second. C'est aussi 70 ans de polémiques visant Herzog, accusé d'avoir capté toute la lumière de cet exploit qui impliquait une vingtaine d'alpinistes. **O. L.**

Après Notre-Dame, du plomb dans le miel

POLLUTION En analysant les concentrations de différents métaux dans 36 échantillons de miel prélevés en juillet 2019 dans Paris et ses alentours, des chercheurs ont noté des teneurs plus élevées de plomb dans les ruches qui étaient situées sous le panache de fumée lors de l'incendie de Notre-Dame. Malgré des concentrations en plomb jusqu'à trois fois et une demie supérieures à celles relevées avant l'incendie, le miel resterait comestible. **A.-S. T.**

SOURCE : KATE SMITH, UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA, VANCOUVER, CANADA.



KATEE SMITH ET AL

La fumée a contaminé les ruches situées au nord-ouest.

S. BOUCHERAND

QUESTIONS À

Sylvain Boucherand,

Président de la commission « biodiversité » à l'Afnor

« Une norme pour la biodiversité »

L'international standard organisation (ISO) vient de confier à la France la création d'une norme encadrant les entreprises dans leurs actions pour réduire leur impact sur la nature.

Pourquoi la biodiversité a-t-elle besoin d'une norme ?
Tous les types d'activité humaine dépendent plus ou moins fortement de la nature. Mais cette dimension est difficile à appréhender. Nous allons donc proposer une méthode qui permettra autant aux entreprises qu'aux collectivités d'analyser leurs impacts et de les diminuer.

Quelles questions spécifiques pose la biodiversité ?
C'est un domaine qui demande particulièrement un consensus fort et l'implication réelle des instances dirigeantes. La France a déjà commencé la réflexion en invitant tout un chacun à participer à l'enquête publique* [en cours jusqu'au 6 septembre] pour définir cette norme. L'objectif est d'examiner les impacts sur la biodiversité des changements d'usage des terres et mers (déforestation, surexploitation des espèces, changement climatique, pollution, dissémination d'espèces exotiques).

Comment vérifier que les entreprises répondent bien à leurs engagements ?
La norme imposera de définir des objectifs précis comme la réduction de la consommation de matières premières ou de l'artificialisation. Des plans d'action seront élaborés avec des moyens dédiés. Cette démarche sera évaluée régulièrement par des organismes certificateurs. **Propos recueillis par L. C.**

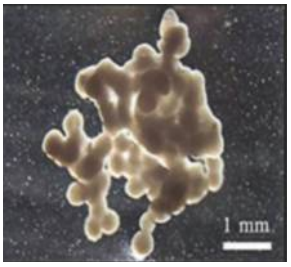
* sciav.fr/883norme

Du cartilage humain créé dans l'espace

Une nouvelle technique a été mise au point dans la Station spatiale internationale.

MÉDECINE SPATIALE Réparer le cartilage des astronautes : l'enjeu est de taille pour imaginer de longs voyages spatiaux, car les articulations souffrent d'un manque de sollicitation musculaire dû à l'absence de gravité.

Sur Terre, la méthode est relativement maîtrisée : elle consiste à assembler des cellules cartilagineuses sur un support pour former un hydrogel. Mais dans l'espace, il manque un ingrédient essentiel : la gravité. C'est elle qui permet de souder les cellules entre elles. Aussi le cosmonaute russe Oleg Kononenko a-t-il validé une nouvelle technique pour créer du cartilage humain dans la Station spatiale internationale (ISS). L'idée est de se servir d'un champ magnétique pour pallier l'absence de gravité. Le cosmonaute avait emporté depuis la Terre des cellules qu'il a ensuite assemblées dans une sorte de four — un bio-assembleur magnétique. Les cellules conservées dans du gel sont libérées dans ce four, puis manipulées à l'aide d'aimants afin de former un tissu. **H. Ru.**



V. PARFENOV, 3D BIOPRINTING SOLUTIONS

À bord de l'ISS, le cosmonaute russe Oleg Kononenko (ci-dessus, à droite) s'est aidé d'un champ magnétique pour imprimer en 3D du tissu humain (ci-contre).

6200

Le nombre de pensées par jour

COGNITION C'est en identifiant à l'IRM un marqueur cérébral de la transition d'une pensée à une autre chez des adultes en bonne santé que des chercheurs canadiens sont arrivés à cette moyenne. Sa mesure pourrait aider un jour à détecter de façon précoce des troubles cognitifs. **H. J.**

SOURCE : JULIE TSENG, UNIVERSITÉ QUEEN'S, KINGSTON, CANADA.

Des séquelles pour les malades d'Ebola

ALAIN TENDERO / DIVERGENCE

Des douleurs musculo-squelettiques peuvent persister.

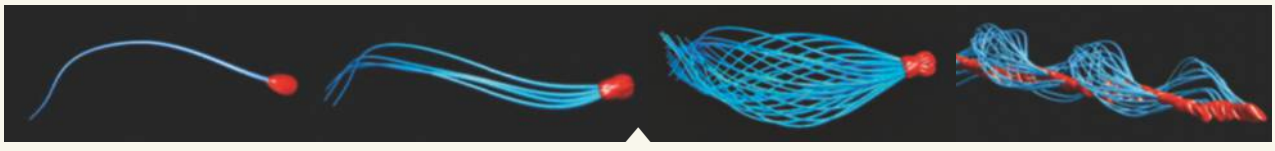
IMMUNOLOGIE Deux ans après avoir contracté la maladie, des patients guéris d'une infection par le virus Ebola présentent toujours des anomalies du système immunitaire. Elles se concentrent sur les anticorps spécifiques du virus et les cytokines, des marqueurs de l'inflammation. Des anomalies biologiques en lien avec des symptômes parfois persistants tels qu'une fatigue généralisée, des douleurs musculo-squelettiques ou des troubles oculaires. **S.R.-M.**

SOURCE : AURÉLIE WIEDEMANN, UNIVERSITÉ PARIS-EST CRÉTEIL.

Des ultrasons pour déplacer les calculs rénaux

NÉPHROLOGIE Afin d'éviter une intervention chirurgicale pour traiter des calculs rénaux, des chercheurs de l'université Washington à Seattle (États-Unis) sont parvenus à déplacer un corps solide de l'urètre à la vessie grâce à des ultrasons. La technique consiste à créer un vortex acoustique avec 256 émetteurs pour faire léviter les calculs. Des premiers tests ont été menés avec succès *in vivo* avec des vessies de porcs. **A. D.**

Les secrets de la nage des spermatozoïdes



POLYMATHS-LAB.COM

Pour avancer, le spermatozoïde tourne sur lui-même en agitant son flagelle toujours du même côté (modélisation).

ANDROLOGIE Une illusion d'optique a longtemps fait croire que les spermatozoïdes nageaient comme des anguilles à l'aide de leur flagelle. Il n'en est rien ! À partir de modélisations 3D, des bio-ingénieurs britanniques et mexicains viennent de montrer qu'ils agitent le flagelle toujours du même côté, de façon à avancer en tournant sur eux-mêmes. Mais le mouvement est si rapide (20 tours/s) qu'il donne l'illusion d'un balancement symétrique **H. J.**

Bruits et sifflements d'oreille

Bourdonnement, tintement, sifflement… Ces bruits sont perçus dans l'oreille sans qu'aucun son n'existe réellement. Moralement et physiquement épuisants, ils peuvent véritablement gâcher la vie.

Acouphènes

Ils sont le plus souvent liés à une perte d'audition ou une mauvaise irrigation sanguine de l'oreille interne, mais leur origine peut aussi être mécanique (torticolis, bouchon de cérumen), traumatique (exposition à un son fort) ou encore psychique (le cerveau interprète mal les signaux du nerf auditif). Il est très difficile d'identifier la cause d'un acouphène, et donc de le soulager efficacement.

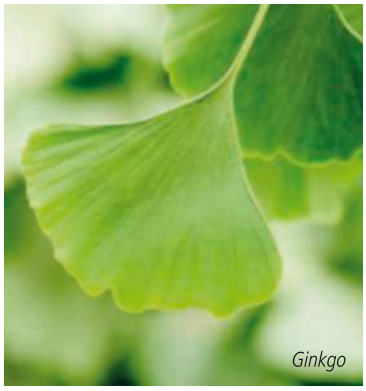
Vivre avec ses gênes auditives

Les générateurs de bruit blanc, la thérapie d'habituation ou encore l'ostéopathie peuvent aider à mieux supporter les gênes auditives, voire à les atténuer. Des produits de santé à base de plantes, tel que **tone**, apportent également une aide naturelle et saine.

Protéger son capital auditif

Développé il y a près de 15 ans par les laboratoires de recherche végétale danois New Nordic, **tone** est une formule naturelle pour préserver l'audition et lutter contre les bruits d'oreille.

tone contient des extraits de Galanga et de Myrtille fortement antioxydants, associés à du Ginkgo qui stimule la microcirculation sanguine et favorise une bonne audition.


Ginkgo

Chaque comprimé apporte aussi du Magnésium qui contribue à maintenir un bon équilibre électrolytique au sein de l'oreille, facilitant la transmission des signaux entre le nerf auditif et le cerveau, ainsi que de la Niacine qui participe au bon fonctionnement du système nerveux.

tone contient enfin de la Vitamine C pour diminuer la fatigue qui accompagne souvent les bruits et sifflements d'oreille.

tone est disponible en pharmacie et parapharmacie. Il est reconnaissable au logo en forme d'arbre argenté de New Nordic, gage de sa qualité supérieure et de sa naturalité.

Une invention suédoise

Sur la base des dernières avancées scientifiques, les laboratoires de recherche végétale New Nordic ont inventé **tone** : un comprimé aux ingrédients fortement concentrés (Sarrasin, Myrtilles, Galanga, Houblon, Vit. B3,C, Magnésium) et contenant en particulier du Ginkgo qui contribue au maintien d'une bonne audition.

Galanga

Disponible en pharmacie et espace diététique

tone™
PRÉSERVER L'AUDITION

tone 60 et 180 cp sous les code **ACL 608 74 56** et **601 67 94.**

Questions ? Les experts New Nordic vous répondent au 01 85 11 34 16 (tarif local) ou sur **www.vitalco.com**

Le moustique anophèle transmet par sa piqûre le parasite « Plasmodium f. ».

BSIP

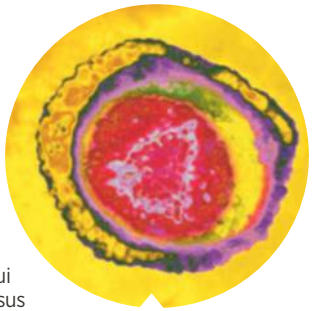
Le gène de résistance aux antipaludiques apparaît en Afrique

INFECTIOLOGIE Au Rwanda, l'agent pathogène du paludisme est en train de devenir résistant au seul traitement efficace, l'artémisinine, alertent des chercheurs du Centre biomédical à Kigali et de l'Institut Pasteur. La mutation apparue localement chez le parasite *Plasmodium falciparum* pourrait rendre inopérants les médicaments actuels comme cela s'est produit dans plusieurs pays d'Asie du Sud-Est depuis les années 2000. **P. K.**

Une thérapie génique contre l'herpès buccal

VIROLOGIE Des chercheurs ont réussi à éliminer, dans des modèles animaux, 90 % du virus de l'herpès buccal (HSV-1) connu pour persister chez l'humain et occasionner des poussées récurrentes. Les scientifiques ont utilisé des ciseaux génétiques afin de couper l'ADN du virus en ciblant les voies nerveuses qui relient le cou au visage et atteindre ainsi les tissus où l'herpès se met en dormance. **H. J.**

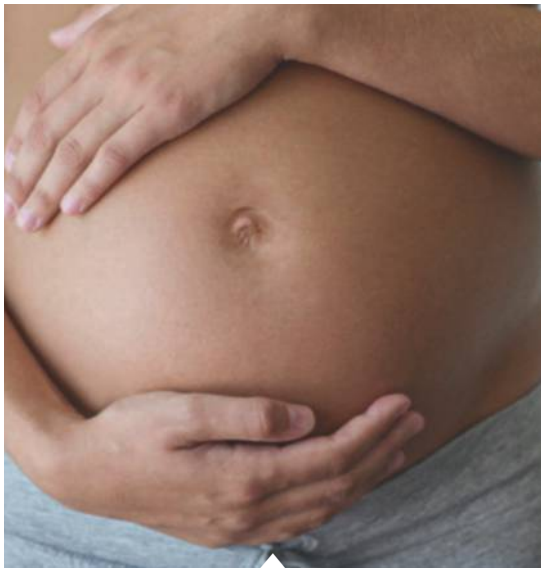
BSIP SOURCE : M. AUBERT, F. HUTCHINSON CANCER RESEARCH CENTER, SEATTLE, ÉTATS-UNIS.



Virus de l'herpès humain vu au microscope.

EN DEUX MOTS

ZIKA. Une seule mutation, absente chez la souche asiatique d'origine, a rendu le virus Zika beaucoup plus infectieux et capable de traverser le placenta pour s'attaquer au système nerveux du fœtus. **PUNAISE.** Une étude inédite de l'Inserm a révélé que les punaises de lit sont le motif de 72 000 consultations de médecine par an, soit environ 200 par jour. **VOIX.** Des travaux israéliens ont démontré que l'analyse de la voix permet de détecter la présence de liquide dans les poumons, un signe en lien avec l'insuffisance cardiaque.



PLAINPICTURE

L'arrêt des activités professionnelles et des transports pourrait expliquer la baisse des naissances prématurées.

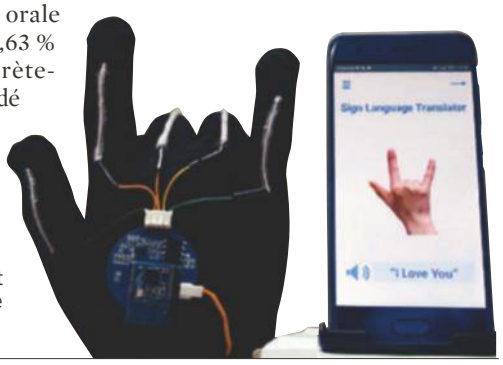
Moins de prématurés pendant le confinement

OBSTÉTRIQUE Entre janvier et juin, le nombre de naissances prématurées et extrêmement prématurées (poids de moins d'un kilo) a chuté de 90 % au Danemark et de 73 % en Irlande selon deux études (en prépublication) conduites dans ces pays pour évaluer les effets du confinement sur les naissances. En France, les données n'ont pas encore été analysées. Ces résultats à confirmer pourraient s'expliquer par l'arrêt des activités professionnelles et des transports. **H. J.**

Ce gant traduit la langue des signes

Il propose une interprétation orale des signes avec 98,63 % d'exactitude en moins d'une seconde.

SOURCES-MUETS Permettre aux personnes qui parlent la langue des signes de communiquer directement avec ceux qui ne la comprennent pas, c'est désormais possible ! Quinze ans après la présentation d'un gant chargé d'identifier les gestes, des bio-ingénieurs de l'université de Californie à Los Angeles (États-Unis) annoncent dans la revue *Nature Electronics* que leur système de traduction est désormais au point : en moins d'une seconde, il propose une interprétation orale des signes avec 98,63 % d'exactitude. Concrètement, le gant est bardé de capteurs filaires qui enregistrent chaque mouvement et les traduisent en un signal électrique qui est envoyé sur une puce électronique. Celle-ci amplifie les signaux principaux et les transmet à un smartphone chargé de faire la traduction et de la diffuser par ses haut-parleurs. L'entraînement de l'algorithme a été réalisé avec l'aide de quatre signeurs sourds qui utilisent la langue des signes américaine. Ils ont répété 15 fois chaque geste de la main pour constituer une base de données de 660 modèles de signes. **C. M.**



JUN CHEN LAB/UCLA

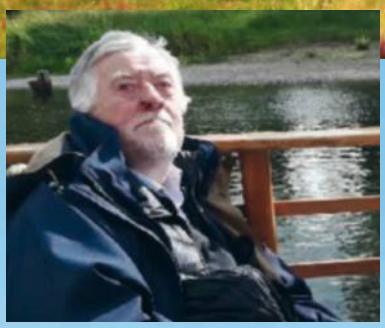
Les gestes de la main sont transmis à un smartphone qui les interprète.

Les voyages du SAVOIR SCIENCES ET AVENIR

DOLMENS ET MENHIRS DE CARNAC

En compagnie d'Yves Coppens (*)

27 au 30 septembre 2020



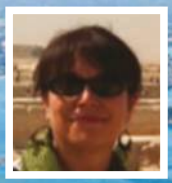
YVES COPPENS
Paléontologue, professeur au Collège de France

« **J'ai 100.000 tonnes de granit sur les bras** ». Yves Coppens s'amuse du nouveau rôle qu'il a accepté d'endosser, celui de « champion » de l'inscription des alignements de Carnac au patrimoine mondial de l'Unesco. Car le site du Morbihan, en Bretagne, n'y est toujours pas : sacrée injustice quand on pense à un autre lieu célèbre pour ses mégalithes, Stonehenge, en Angleterre, honoré du précieux label depuis... 1986 ! Il explique ce que les dolmens, menhirs, cairns et autres alignements de Carnac auraient à bénéficier de cette inscription au patrimoine mondial de l'Unesco, pourquoi ce site est «sacré» et le rôle historique joué par la Bretagne - chère à son cœur... - dans l'histoire du mégalithisme.

C'est à la découverte de ces « cailloux » extraordinaires sur les rivages du golfe du Morbihan qu'Yves Coppens invite les lecteurs de Sciences et Avenir !

Retrouvez l'entretien complet d'Yves Coppens avec Dominique Leglu sur le site web de Sciences et Avenir : bit.ly/2tFuekq

AVEC LA PARTICIPATION DE :



BERNADETTE ARNAUD
Grand Reporteur à Sciences et Avenir

© Laurent Rannou

EMMANUELLE VIGIER
Archéologue, directrice du Musée de Préhistoire de Carnac

MARC SAUGIER
Organisateur des Voyages du Savoir

Carnac :
Le musée de Préhistoire

- 3 nuits / 4 jours en pension complète
- Prix par personne en chambre double : 975 €
- Début & fin du séjour à Auray (Morbihan)

(*) Sauf empêchement pour cas de force majeure

IM056130002

BLB TOURISME

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS : **BLB** TOURISME
ZONE DE KERBOIS 15, RUE YVES DE KERGUELEN 56400 AURAY
- COURRIEL : inscription@blb-tourisme.com - Tél. +33 (0) 297 566 086

Programme complet, renseignements et inscriptions sur le site web : voyages-du-savoir.fr

Un dauphin artificiel plus vrai que nature

Cette combinaison de robotique et d'IA pourrait remplacer les véritables animaux dans les parcs aquatiques.

EDGE INNOVATIONS

La machine sait plonger, rester immergée puis remonter à la surface en utilisant son évent.

ANIMATRONIQUE Des robots à la place des dauphins dans les parcs aquatiques : l'idée est devenue réelle avec ce cétacé plus vrai que nature conçu par deux entreprises, Edge Innovations, spécialisée dans les technologies marines, et Geo AR Games, qui développe des produits fondés sur la réalité augmentée. Le squelette de la machine reproduit fidèlement la structure de celui d'un grand dauphin adolescent, tandis que sa peau est réalisée en silicone de qualité médicale. « *Des actionneurs électriques ont été ajoutés au squelette afin d'imiter le travail des principaux groupes musculaires du dauphin*, explique Roger Holzberg, en charge de l'expérience utilisateur. *Des mâchoires, des dents, des yeux et bien d'autres détails sont ensuite venus le compléter.* » La peinture a enfin été confiée à un artiste qui a travaillé à partir de photos haute définition. L'« animatronique » est capable, grâce à l'intelligence artificielle, de plonger en eau peu profonde, rester immergé et remonter à la surface puis utiliser son évent pour simuler une respiration. Ce qui lui a permis de décrocher le prix de l'innovation de l'association américaine Peta dédiée à la défense des animaux. **A.-S. T.**

74 500 dollars Le prix du quadrupède de Boston Dynamics

ROBOTIQUE Spot est le plus connu des robots de la firme américaine Boston Dynamics. Ce quadrupède à l'agilité confondante a été dévoilé en 2016. Dépourvu de tête, il peut se voir greffer quantité d'équipements (lidar, caméra, unité de calcul). On peut désormais l'acquérir pour l'équivalent de 63 260 euros. **A. D.**

Un robot mou activé par la lumière

BIONIQUE Des polypes de massifs coralliens ont inspiré un robot inédit. Fabriqué en polymères à cristaux liquides, il réagit sous l'eau à la lumière : l'ultraviolet provoque le repli de ses pétales et le bleu leur épanouissement. Il peut ainsi attraper ou relâcher des particules contaminant l'eau pour la nettoyer. Son pied, sensible au magnétisme, déclenche une rotation qui génère un courant permettant au polype de faire venir à lui les particules à attraper. **A. D.**

SOURCE : MARINA PILZ DA CUNHA, UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE D'EINDHOVEN, PAYS-BAS.

NANDO HARMSEN

◄ **Les « pétales »** se replient ou se déploient sous l'eau selon la lumière.

BEN-GURION UNIVERSITY OF THE NEGEV / WEIZMANN INSTITUTE OF SCIENCE

Un télescope et un capteur « écoutent » les microvibrations sur les ampoules.

Les lampes sont des mouchardes !

ACOUSTIQUE Attention : sans aucun micro, une simple lampe allumée peut trahir à distance le contenu d'une conversation. Les voix provoquent en effet de microvibrations sur les ampoules et des scientifiques ont réussi à intercepter ces altérations de lumière en braquant sur une fenêtre un télescope muni d'un capteur électro-optique. Ils ont ainsi traduit en temps réel des chansons pop et un discours de Donald Trump, à 25 mètres de distance, et même rideaux baissés ! **A. D.**

SOURCE : BEN NASSI, UNIVERSITÉ BEN-GOURION DU NÉGUEV, ISRAËL.

Des fenêtres antibruit, quand elles sont ouvertes

ACOUSTIQUE Ouvrir la fenêtre pour moins entendre la rue : c'est l'étonnante idée développée par des scientifiques de l'université de technologie de Nanyang à Singapour.
Le principe : un micro capte les sons urbains, qui sont analysés par un algorithme. Une onde sonore inverse est alors envoyée par 24 haut-parleurs fixés à la fenêtre ouverte, annulant le bruit extérieur.
Le système serait plus efficace qu'une fenêtre fermée. **A. D.**

Vous avez le sens de l'étiquette.
Bexley
Chaussures Ville
Cuir de veau patiné
149€
Prix Unique
99€ la 2ème paire au choix
Bien sûr, vous avez bon goût. Le bon goût de ne jamais faire de faute de goût quelle que soit l'occasion. Et pour ne jamais commettre d'impair vous choisissez Bexley et ses modèles assurément dans les bons codes de l'élégance, de ce qui fait l'étiquette dans toutes sociétés. Mais là où vous excellez en matière de bon goût, c'est que vous avez l'intelligence de ne pas y laisser votre chemise, de mettre le bon prix, le prix de l'exigence, de l'excellence des matières, des savoir-faire français et c'est aussi ça, avoir le sens de l'étiquette.
Nos boutiques
#lesensdeletiquette | Bexley.fr
AIX-EN-PROVENCE I ANNECY I BORDEAUX I PARLY 2 - LE CHESNAY I LILLE I LYON 1ER I LYON 2ÈME I LYON 6ÈME I MARSEILLE I NANTES I NICE I PARIS 4ÈME - HENRI IV I PARIS 6ÈME - SAINT GERMAIN I PARIS 7ÈME - RASPAIL I PARIS 8ÈME - CHAUVEAU LAGARDE I PARIS 8ÈME - CHAMPS ÉLYSÉES I PARIS 8ÈME - LA BOÉTIE I PARIS 15ÈME - VAUGIRARD I PARIS 17ÈME - PALAIS DES CONGRÈS I PARIS - LA DEFENSE I TOULOUSE I STRASBOURG I BRUXELLES

Sur la piste de L'ANTIMATIÈRE

Les physiciens ont mis en lumière pour la première fois un comportement différent entre matière et antimatimatière. Mais une énigme demeure : où est passée l'antimatière alors qu'il s'en est formé autant que de matière au moment du Big Bang ? La réponse pourrait venir dès l'an prochain des expériences menées au Cern à Genève.

Dossier réalisé par
Azar Khalatbari

JEAN-FRANCOIS PODEVIN/SCIENCE PHOTO LIBRARY

La surprise est venue du Japon au printemps : l'une des expériences phares de physique a enfin détecté une infime différence de comportement entre matière et antimatière. Une première fracassante qui a fait la une de la revue *Nature* et qui enthousiasme les physiciens qui tiennent enfin le début d'une piste pour traquer cette mystérieuse antimatière dont nul ne sait ce qu'elle est devenue aussitôt après le Big Bang... ni pourquoi elle a brusquement disparu au profit de la matière. L'expérience T2K (Tokai to Kamiokande) a en effet apporté la preuve, pour la toute première fois, que *« les neutrinos* [particules élémentaires] *oscillent davantage que leurs particules d'antimatière, les antineutrinos !*, s'enthousiasme Sara Bolognesi, responsable de l'expérience au CEA (Saclay, Essonne). *Même si ce résultat doit encore être confirmé au cours des prochaines années.* » En cumulant dix ans de données, l'équipe de T2K a en effet fait ses comptes : elle a ainsi repéré l'apparition de 89 neutrinos dits électroniques et de sept antineutrinos électroniques au lieu des 67 neutrinos électroniques attendus si matière et antimatière s'étaient comportées de manière identique au moment du Big Bang. Or les théoriciens s'étaient déjà penchés sur la question, modélisant ce que devraient être les données si matière et antimatière ne suivaient pas le même chemin. Soit exactement ce que sont venus confirmer ces résultats expérimentaux. Si cette différence de comportement est autant précieuse, c'est qu'elle va désormais permettre aux physiciens de distinguer et reconnaître l'antimatière dans leurs expériences et ainsi espérer la traquer.

SARA BOLOGNESI

« Nous avons découvert que les neutrinos oscillent davantage que leur particule d'antimatière, les antineutrinos ! »

Sara Bolognesi, physicienne, responsable de l'expérience T2K (Tokai to Kamiokande) au CEA, à Saclay (Essonne)

Les chercheurs savourent d'autant plus ce résultat que l'antimatière n'était pas exactement l'objet d'étude de T2K. cette expérience est en effet consacrée aux neutrinos. Pour comprendre, il faut rappeler que ces particules quasi insaisissables et très légères interagissent très peu avec la matière qui nous entoure : chaque seconde, notre corps est d'ailleurs traversé par des millions de millions d'entre elles sans même que nous les ressentions. Comme toutes les particules, les neutrinos possèdent leurs doubles, les antineutrinos, dont il existe trois « saveurs » (familles) selon ce que l'on nomme le « modèle standard » de la physique : électronique, muonique et tauique.

Au cœur de l'accélérateur de particules Tokai

Or, depuis 1998, les physiciens savent que les neutrinos « oscillent ». Ce comportement quantique — appelé oscillation — se traduit par le fait que les neutrinos passent d'une saveur à l'autre tout en se propageant. « *Cela implique qu'ils ont une masse, mais elle doit être extrêmement petite, de sorte que nous ne l'avons pas encore mesurée* », rappelle Sara Bolognesi. Et c'est donc pour mieux comprendre ces oscillations que plus de 500 chercheurs appartenant à 60 instituts de recherche à travers le monde — avec une forte présence européenne — se sont unis au sein de la collaboration T2K. Celle-ci constitue l'une des installations les plus étonnantes de physique dans l'accélérateur de particules Tokai situé dans le laboratoire J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex), sur la côte est du Japon. Concrètement, cet accélérateur produit des faisceaux de neutrinos et d'antineutrinos muoniques dont les chercheurs mesurent la composition en particules de différentes saveurs. Ces particules sont alors expédiées à 295 km de là, au Super-Kamiokande, où elles aboutissent dans une gigantesque cuve remplie de 50 000 tonnes d'eau. Les parois y sont tapissées de photomultiplicateurs permettant de marquer le passage des particules par une émission de lumière. En identifiant chacune d'entre elles, les physiciens peuvent comptabiliser les changements de « saveur » entre le point de départ et le point d'arrivée, à la fois pour les neutrinos et les antineutrinos. Et c'est ainsi qu'après dix ans de fonctionnement, les chercheurs ont été en mesure de détecter une différence d'oscillation entre les deux et d'offrir ainsi ce résultat extraordinaire à la discipline !

JAN EIFERT / DPA PICTURE-ALLIANCE/AFP

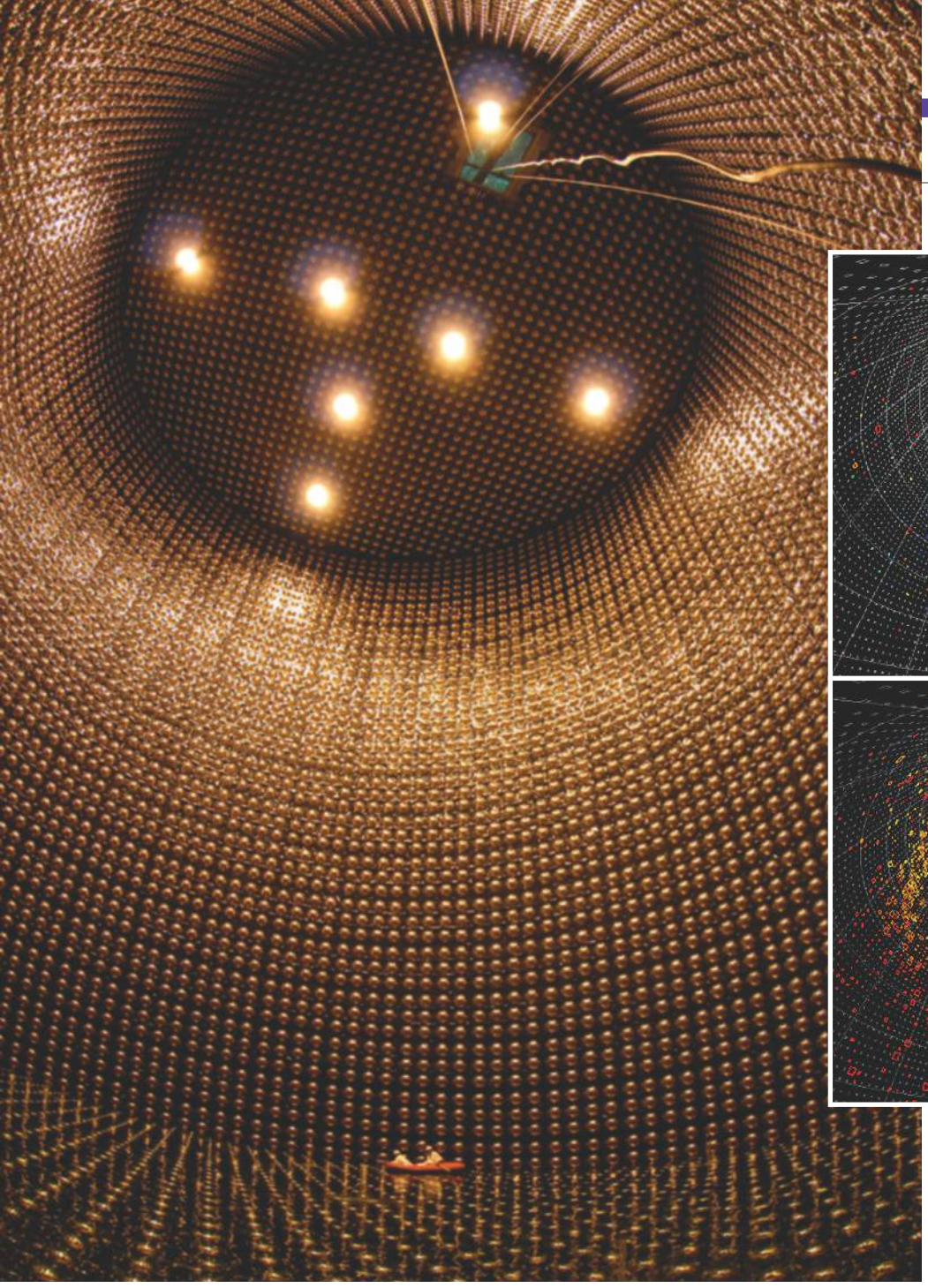
OBSERVATION

Un étrange phénomène dans les orages

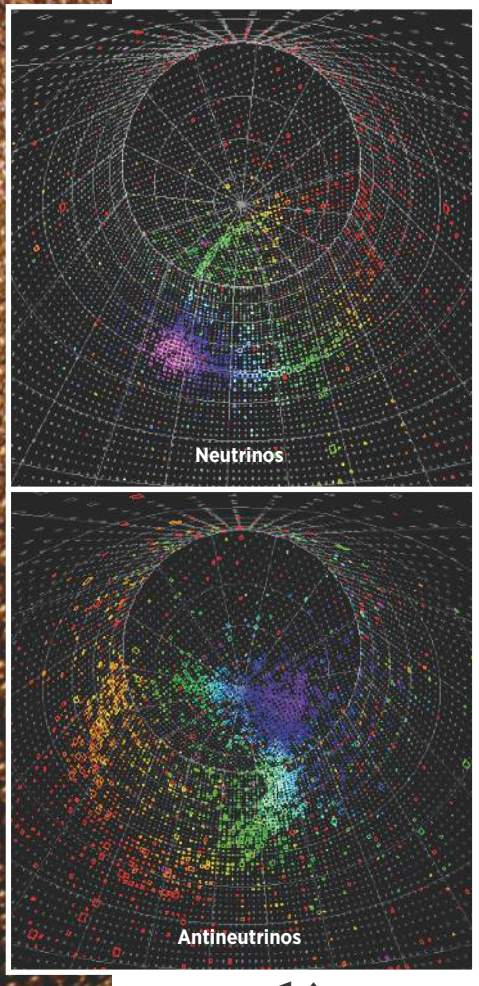
C'est une étonnante découverte qui remonte à 2009. L'énergie dégagée par l'annihilation d'une paire électron-positon (matière-antimatière, soit un excès d'émission de 511 kiloélectronvolts) dans un RGT (rayonnement gamma terrestre) a été enregistrée par le satellite Fermi de la Nasa, sensible aux rayons gamma — les plus énergétiques du spectre électromagnétique. Quelle étrange activité se déroulait alors dans la haute atmosphère ? Réponse : orage et éclair ! Le puissant champ magnétique créé au moment de l'éclair arrache en effet des électrons et les accélère, au point de produire des rayons gamma, qui percutent les molécules de l'air et deviennent les électrons de leurs atomes, qui continuent à gagner en énergie. Leur collision avec d'autres molécules de l'air fait alors apparaître de manière très éphémère des paires électron-positon. Un seul éclair en produit des milliards.

Sous terre, dans l'espace, à bord de la navette spatiale...

L'indice d'une différence d'oscillation entre neutrinos et antineutrinos est certes très précieux, mais il est encore maigre pour résoudre cette fameuse énigme qui perdure depuis les années 1930 : où a donc bien pu passer l'antimatière, sachant qu'au moment du Big Bang, il s'est créé autant de matière que d'antimatière et que l'Univers que nous connaissons aujourd'hui n'est fait que de la première ? Pour illustrer le propos, prenons l'électron — la particule élémentaire de la matière ordinaire — et son double, l'antiélectron, aussi nommé positon : même masse, même comportement, juste une charge positive là où l'électron est chargé négativement. Sauf que... ces deux-là — représentant matière et antimatière donc — doivent impérativement rester séparés sous peine de s'annihiler, se transformant alors en pure énergie. Au sein de leur laboratoire, les physiciens ont même précisément repéré l'instant de cette annihilation, signée par un puissant flash : la rencontre de l'électron et de son double est caractérisée par l'émission de 511 kiloélectronvolts (keV) exactement ! Hélas, surprendre un flash d'une



KAMIOKA OBSERVATORY, ICRR, UNIVERSITY OF TOKYO



T2K INTERNATIONAL COLLABORATION / KAMIOKA OBSERVATORY, ICRR, THE UNIVERSITY OF TOKYO

Les 11 000 photomultiplicateurs de l'observatoire Super-Kamiokande, au Japon (à gauche), détectent un signal lumineux différent pour les neutrinos (ci-dessus, en haut) et les antineutrinos (en bas).

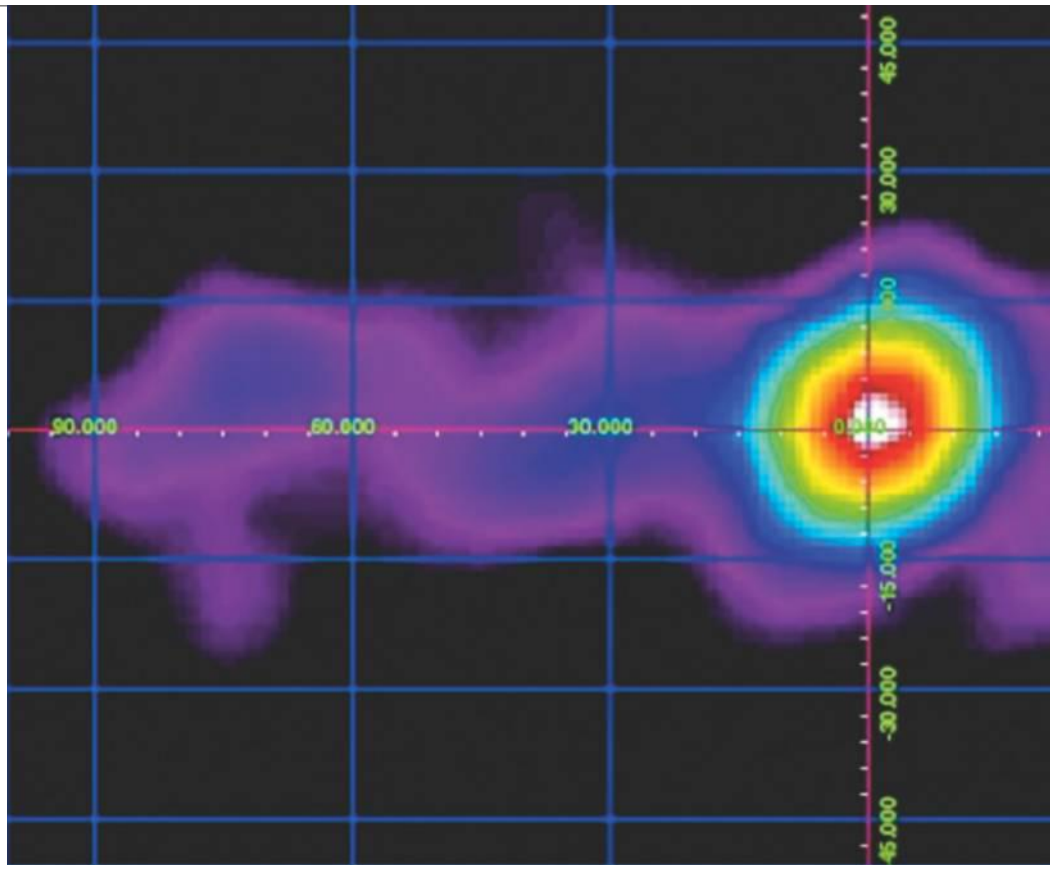
telle énergie ne signifie pas pour autant la découverte de l'antimatière, car de nombreux processus astrophysiques créent ainsi des paires « particules-antiparticules » qui disparaissent juste après s'être formées.

En outre, les chercheurs se posent une autre question : pourquoi donc ces deux entités qui sont apparues à parts égales au moment du Big Bang ne se sont-elles pas annihilées, laissant l'Univers totalement vide ? Ce qui rappelle l'interrogation métaphysique du philosophe et mathématicien allemand Gottfried Wilhelm Leibniz : *« Pourquoi y a-t-il quelque chose plutôt que rien ? »* Pour avancer dans cette traque, les physiciens ont donc multiplié les expériences sous terre, dans l'espace, à bord de la Station spatiale internationale… En vain ! Aucune région contenant de l'antimatière qui daterait du Big Bang n'a été repérée. Les expériences les plus sophistiquées n'ont même montré jusque-là qu'une très grande similarité entre matière et antimatière, comme ce fut le cas pour l'expérience Alpha en avril 2020 au Cern, à Genève (Suisse) : les mêmes propriétés quantiques ont été mesurées sur l'hydrogène et l'antihydrogène, *« la différence d'énergie entre deux niveaux hyperfins de l'atome d'hydrogène est strictement similaire à celle de l'antihydrogène, même si cette mesure est très délicate et la précision de seulement 11 % »*, précise Yves Sacquin, de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers, au CEA. Il faudra sûrement aller

plus loin pour espérer peut-être surprendre une infime différence...
Mais le Cern n'a pas dit son dernier mot et explore d'autres voies. Malgré de nombreux doutes, les physiciens espèrent tout de même une très grosse surprise dès 2021, au redémarrage de l'anneau PS, le synchrotron à protons qui alimente aussi le LHC, aujourd'hui à l'arrêt pour entretien : trois expériences en cours de montage (Gbar, Alpha-g, Aegis) pourraient changer la donne en révélant que l'antimatière se comporte différemment de la matière dans un champ de gravité.

Et si l'antimatière se dirigeait vers le ciel ?

Ainsi, là où tous les objets faits de matière tombent en direction du sol, l'antimatière pourrait bien... se diriger vers le ciel *(lire p. 38)*. Cette gravité négative serait l'un des résultats les plus étonnants de la physique. Pour commencer, cela liquiderait notre énigme ! Car si l'antimatière a une gravité négative, elle se serait écartée tout naturellement de son double doté d'une gravité positive, évitant ainsi l'annihilation. L'antimatière serait donc « quelque part », loin de cette matière qui constitue notre monde, et pourrait même être la cause du vide que l'on observe entre les amas de galaxies.
Cette étrange propriété viendrait aussi au secours des cosmologistes, confrontés à trois inconnues qui empoisonnent la discipline : l'inflation de l'Univers, l'énergie noire, et la matière noire. Ce n'est pas tout : la gravité négative constituerait une nouvelle interprétation des données cosmologiques, un défi pour les prochaines décennies. ■

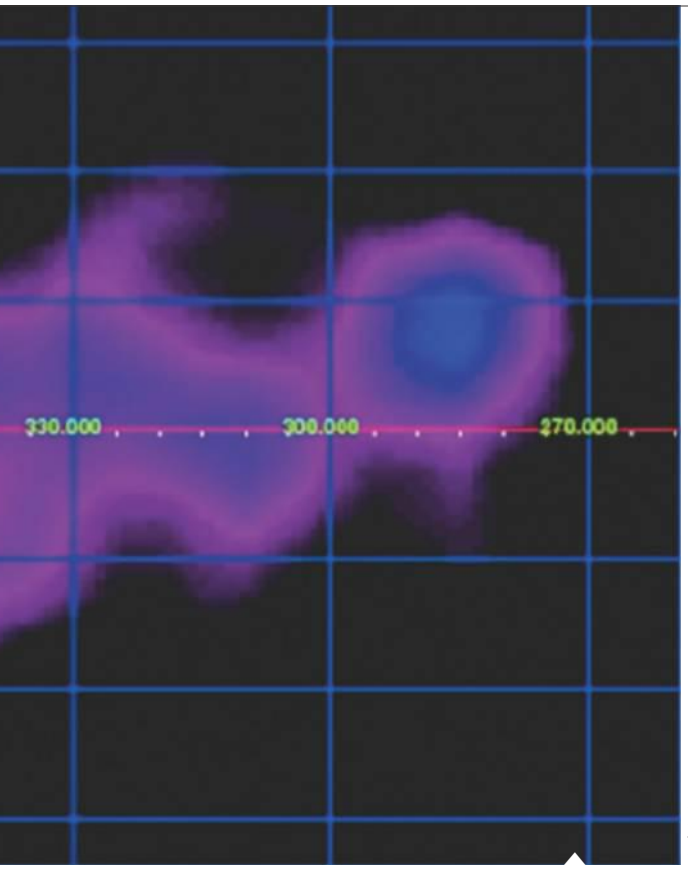


3 interrogations fondamentales

Tandis que des équipes traquent les anti-atomes dans l'espace, d'autres tentent d'en fabriquer au sein des laboratoires afin de mettre sur pied des expériences montrant une éventuelle différence matière-antimatière.

1 Où est passée l'antimatière ?

Existerait-il quelque part dans l'Univers, bien cachées au-delà de la région à portée des télescopes, des antigalaxies renfermant des anti-étoiles ? Cette hypothèse sérieuse soulève une foule de questions, dont la première est : pour quelle raison les astronomes n'ont-ils jamais détecté le flot de rayons gamma résultant de l'annihilation qu'aurait dû produire la rencontre entre matière et antimatière qui existaient à parts égales au moment du Big Bang ? En attendant, l'antimatière n'apparaît que de manière secondaire et furtive dans l'Univers qui est à notre portée : au sein des laboratoires ou dans la nature, au cœur des éclairs *(lire l'encadré p. 32)* où lors de l'impact des rayons cosmiques. Ce constat pousse les physiciens à chercher le processus qui, au cours de l'histoire du cosmos, a rompu cette symétrie d'origine qui



ESA/BOUCHET ET AL.

Un rayonnement à 511 keV, correspondant à l'annihilation de l'électron et de son antiparticule, le positon, avait été détecté dans les régions centrales de la Voie lactée par le satellite Integral de l'Agence spatiale européenne (ESA) dès 2003. Mais il s'agit de formation très éphémère d'antimatière auprès des étoiles très denses.

existait entre matière et antimatière. Une « brisure de symétrie » qui pourrait expliquer la victoire de la matière sur son double. Entre les deux, la nature impose en effet de subtiles différences : les charges électriques négative ou positive que portent les particules auxquelles s'ajoutent quelques propriétés quantiques telle la parité, c'est-à-dire leur orientation dans l'espace, comme une image inversée dans un miroir.

Ainsi, en toute logique, si l'antimatière a disparu, c'est qu'un événement survenant dans l'enfance de l'Univers a agi différemment selon la charge et la parité des particules. Une explication a été fournie en 1967 par le physicien russe Andreï Sakharov, lauréat du prix Nobel de la paix (1975). Son explication concerne la baryogenèse, c'est-à-dire la formation des particules qui composent aujourd'hui le noyau atomique, les neutrons et les protons (nucléons). Ils sont chacun composés de trois quarks de « saveurs » différentes, ces particules élémentaires qui se sont assemblées lorsque l'Univers était âgé de quelques fractions de seconde. Or, aussitôt après le Big Bang, l'asymétrie matière-antimatière est probablement survenue, bien avant que ces nucléons ne parviennent à former les noyaux des atomes qui constituent la matière. L'hypothèse d'Andreï Sakharov est que les conditions étaient alors telles qu'à chaque fois qu'il se formait un milliard d'antinucléons, se constituaient aussi un milliard de nucléons... plus un ! Et c'est à ce nucléon supplémentaire que nous devrions notre existence. En effet, toujours selon lui, les antinucléons ont tous été annihilés par leur double de matière... sauf l'infime excédent qui a formé notre Univers. Mais cette explication communément admise ne suffit cependant pas à rendre compte de la disparition totale de l'antimatière telle que nous la constatons aujourd'hui. Le mystère demeure.

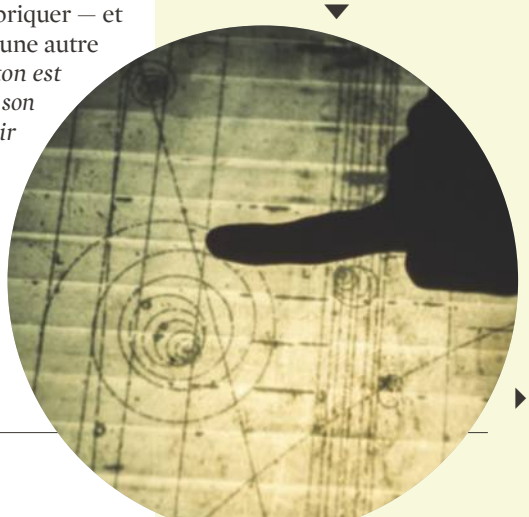
2 Comment en fabriquer ?

L'élément chimique le plus simple et le plus abondant de l'Univers est l'hydrogène, formé d'un électron autour d'un proton. La recette de l'antihydrogène en découle : un anti-électron (positon) autour d'un antiproton. Mais pour le fabriquer — et le conserver — c'est une autre affaire ! *« L'antiproton est toujours fabriqué avec son double. Il faut fournir au moins l'énergie de masse des deux particules pour les matérialiser*, explique Pauline Comini, du CEA (Saclay, Essonne). *Ensuite, il faut parvenir à récupérer l'antipar-*

HISTOIRE

Quand Dirac prédisait l'antimatière

En 1928, le physicien britannique Paul Dirac travaille sur une équation — qui portera son nom — et qui tente d'allier la relativité restreinte d'Einstein et la toute jeune théorie quantique. Celle-ci admet deux solutions : l'une est l'électron, particule de matière bien connue, avec une énergie positive. L'autre serait une particule en tout point identique à l'électron, mais d'énergie négative... une configuration que les chercheurs pensaient alors impossible. Dirac prédit ainsi qu'à chaque particule de matière est associée une particule d'antimatière, tout à fait semblable mais de charge opposée. Ainsi, l'électron formerait une paire avec l'antiélectron (appelé positon). En 1932, l'Américain Carl Anderson est le premier à identifier expérimentalement la trace de cette antiparticule ! L'année suivante, Paul Dirac partage le prix Nobel de physique avec l'Autrichien Erwin Schrödinger, l'un des pères de la mécanique quantique.



LARRY MULVEHILL/SCIENCE PHOTO LIBRARY

De tels tracés ont permis d'identifier l'antimatière dans les accélérateurs de particules.

PAULINE COMINI

PHYSICIENNE À L'INSTITUT DE RECHERCHES SUR LES LOIS FONDAMENTALES DE L'UNIVERS, CEA-PARIS-SACLAY

« Contenir de l'antihydrogène en bouteille est ardu ! »

Au Décélérateur d'antiprotons (AD), l'usine d'antimatière du Cern, on apprécie les bonnes bouteilles… d'antimatière, bien sûr ! Une passion bientôt partagée avec d'autres laboratoires car des antiprotons ainsi conditionnés vont prendre la route. Une première ! De la fine fiole destinée à un unique ion d'antihydrogène au robuste fût conservant des antiparticules à foison, ces flacons partagent un paradoxe : ils sont avant tout… vides. De plus, l'antimatière ne doit pas en frôler les parois. C'est donc une impalpable nasse électromagnétique qui la piège : tantôt un champ électrique oscillant rapidement fait danser sur place les particules chargées, tantôt un intense champ magnétique les force à tournoyer, le tout secondé de barrières électrostatiques. Contenir de l'antihydrogène neutre est plus ardu et requiert des champs magnétiques variant sur de courtes distances. Cette antimatière embouteillée à l'AD, l'expérience PUMA veut à présent l'exporter ! Son défi : encapsuler 1 milliard d'antiprotons dans un appareillage de 7 tonnes — un énorme aimant supraconducteur, des pompes à vide, des détecteurs intégrés, un générateur — et jucher le tout sur un camion pour 2 km de balade. Direction l'installation Isolde, où l'on distille des ions rares et éphémères qui seront introduits dans une partie dédiée du piège. Les antiprotons, s'annihilant avec tout nucléon (proton, neutron), serviront à sonder la structure externe des noyaux

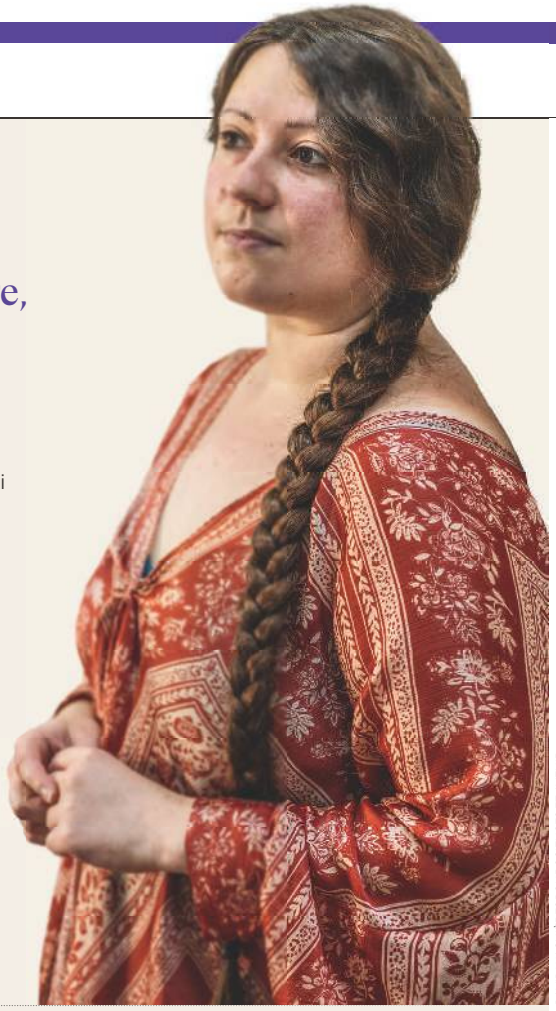
RÉMY CORTIN POUR SCIENCES ET AVENIR

GABRIEL CHARDIN

PHYSICIEN AU LABORATOIRE ASTROPARTICULES ET COSMOLOGIE, À PARIS

« Si l'antimatière "tombe" vers le haut, les changements sont drastiques pour l'univers primordial »

Au fil des années, l'idée d'une antimatière qui "tombe" vers le haut est devenue beaucoup moins invraisemblable. Elle est à l'origine du modèle d'Univers dit de Dirac-Milne, que nous avons élaboré. Quelles en sont les conséquences ? Pour l'Univers d'aujourd'hui, pas grand-chose : pour le modèle cosmologique standard, notre époque est extrêmement proche d'un Univers vide, avec autant de masses positives que négatives. En revanche, pour l'Univers primordial, les changements induits sont drastiques : la nucléosynthèse, fabrication des éléments nucléaires légers, ne dure plus 3 minutes… mais environ 30 ans. Or on sait depuis 1998 que la nucléosynthèse d'un Univers sans accélération ni décélération est étonnamment proche de celle du modèle cosmologique standard.



DAVID WAGNIÈRES POUR SCIENCES ET AVENIR

« Pour déplacer les bouteilles d'antimatière, il faut un appareillage de 7 tonnes juché sur un camion »

Pauline Comini a reçu le prix Daniel Guinier 2014 de la Société française de physique qui récompense un jeune chercheur.

et à étudier notamment ceux qui exilent quelques nucléons dans un halo. Sur cette lancée, l'expérience Base souhaite aussi déplacer ses antiprotons pour s'affranchir du bruit électromagnétique de l'AD et ainsi améliorer la précision de ses mesures. Prochain vœu au génie de ces bouteilles : expédier des antiprotons hors du Cern. »

Le principal problème était l'absence de deutérium, un élément très fragile, justement produit par l'annihilation matière-antimatière à la frontière des domaines. Plus besoin par ailleurs d'envisager la phase d'« inflation » du modèle standard : l'Univers de Dirac-Milne est en permanence au bord de l'inflation, avec un horizon à distance infinie qui permet d'expliquer l'homogénéité de l'Univers des premiers instants. Autre conséquence, l'asymétrie matière-antimatière existe bien mais reste un effet très faible. L'antimatière elle-même survit en quantités égales à la matière, là aussi en complète opposition avec le modèle standard, restant confinée en de grands nuages froids séparés de la matière par de grands vides, ou zones de déplétion. Enfin, plus besoin d'invoquer une « énergie noire », cette énigmatique entité qui accélère l'expansion de l'Univers, remplacée par l'effet répulsif de l'antimatière, ni même de "matière noire", cette masse censée expliquer les grandes structures, introuvable depuis plus d'un demi-siècle. »

« Avec une antimatière dotée d'une gravité négative, nombre d'énigmes cosmologiques seront résolues »

Gabriel Chardin, médaille d'argent du CNRS, a écrit plusieurs livres, dont « L'Insoutenable Gravité de l'Univers » (Le pommier, 2018).

ticule et la conserver de manière à ce qu'elle ne rentre pas en contact avec la matière, grâce à un champ magnétique et un vide très poussé. » En raison de ces difficultés il a fallu attendre 1995 pour que neuf antihydrogènes puissent enfin être fabriqués.

Au Cern, une machine unique en son genre

Depuis, les physiciens ont fait beaucoup de progrès : l'étape importante a été la mise au point du décélérateur d'antiprotons (AD) au Cern, près de Genève (Suisse), une machine unique en son genre puisqu'elle ralentit les particules. C'est l'outil indispensable pour fabriquer des anti-atomes. En effet, le synchrotron à protons (PS), qui alimente aussi l'anneau du Grand collisionneur de hadrons (LHC) du Cern, envoie ses protons sur une cible métallique. De cette collision naissent beaucoup d'antiprotons. Mais leur vitesse est telle qu'il n'est pas facile de les maîtriser pour les associer avec un positon afin de fabriquer un antihydrogène. Il faut donc les ralentir... jusqu'à 1/10 de la vitesse de la lumière ! Ainsi, l'AD produit 20 à 30 millions d'antiprotons toutes les deux minutes.

En 2021, un nouvel anneau de décélération viendra lui prêter main-forte : ELENA (Extra Low Energy Antiproton) réduira encore l'énergie des antiprotons de 5,3 mégaélectronvolts (MeV) à 0,1 MeV, soit environ 1/100 de la vitesse de la lumière. Le but : faciliter la capture d'antiprotons pour les différentes expériences. « *Aujourd'hui, l'expérience G-bar s'apprête à battre le record d'accumulation de positons, soit quatre milliards*, poursuit Pauline Comini. *Et l'expérience Alpha est capable de piéger simultanément 500 antihydrogènes.* » La palme du stockage revient cependant à l'expérience Base, toujours au Cern, qui étudie les propriétés magnétiques

JULIEN ORDAN/CERN

L'expérience GBar, au Cern à Genève, vise à observer la chute libre d'un atome d'antihydrogène obtenu à partir d'un gaz de positonium.

du proton et de l'antiproton : *« Les chercheurs ont conservé 1000 antiprotons pendant plus d'un an dans leur flasque scellée, où le vide approche celui de l'espace intersidéral. Leur durée de vie est estimée à plus de onze ans*, raconte la physicienne. *Mais au cours des manipulations, certains sont perdus. Au bout d'un an, il n'en restait plus que quelques dizaines ! »*

3 L'antimatière « tombe »-t-elle en l'air ?

Au Cern, trois expériences (Aegis, Alpha-g et Gbar) tentent de trancher cette surprenante question : à la différence de la matière qui tombe vers le sol, l'antimatière monte-t-elle vers le ciel ? Pour ces expériences, il serait bien plus pratique aux chercheurs de disposer d'une particule chargée qui se met en mouvement dans un champ électromagnétique. *« Or, la force gravitationnelle est si faible que les effets de la force électromagnétique — dus à la charge de la particule — la masqueraient »*, explique Yves Sacquin, du CEA. Il faut donc mener ces expériences avec l'antihydrogène, qui est neutre. Fabriquer cet anti-atome est donc la première difficulté. Pour ce faire, les trois expériences utilisent des approches différentes. Pour Alpha-g, l'anti-atome se forme au sein même de la chambre d'expérience verticale d'un mètre de hauteur, en y injectant des positons et des antiprotons. *« Ensuite, l'antihydrogène oscille entre le haut et le bas de la chambre, et si tout se passe pour lui comme pour son double de matière, une fois arrivé en bas, il gagne en énergie et sa température augmente de 1,2 millikelvin »*, poursuit le physicien. Le niveau d'énergie du piège est alors abaissé pour que les antihydrogènes qui atteignent cette énergie puissent sortir. Et il suffit alors de les décompter pour estimer l'effet de la gravité sur l'antihydrogène.

Les deux autres expériences (Aegis et Gbar) fabriquent leurs antihydrogènes à partir d'un gaz de positonium, un « atome exotique » formé d'un positon et un électron qui ne vit que 142 nanosecondes. *« Une durée suffisante pour le faire interagir avec des antiprotons et fabriquer ainsi un atome d'antihydrogène »*, précise Yves Sacquin. Après cette première étape, les deux expériences diffèrent : dans Aegis, l'antihydrogène acquiert une vitesse initiale et, tel un ballon lancé, sa trajectoire est affectée par sa vitesse et la gravité qu'il subit. Son impact sur la plaque du détecteur s'en trouve décalé de quelques dizaines de micromètres et cette mesure précise permet d'avancer une estimation de la gravité.

Dans l'expérience Gbar, c'est la chute libre d'un antihydrogène dans le champ de gravité qui est observée. Mais pour le suivre, il faut qu'il tombe mille fois moins vite que dans Aegis. *« Pour ce faire, nous lui rajoutons une charge électrique pour obtenir de l'antihydrogène ionisé, que nous savons faire ralentir dans un piège spécial »*, ajoute le chercheur. En tombant — vers le haut ou le bas — il impacte les parois de l'enceinte constituée, bien sûr, de matière. Il en résulte une réaction d'annihilation qui émet des particules secondaires, des pions (Pi). *« Ces dernières sont analysées par des détecteurs qui reconstituent ainsi la chute de l'antihydrogène. »* La moindre différence avec la chute de l'hydrogène permettra aux physiciens d'émettre des hypothèses sur la nature de l'antimatière. Ils sauront ainsi si cette fameuse gravité négative, dont beaucoup de chercheurs doutent, est une hypothèse valable. Rendez-vous mi-2021. ■

1ère édition

FORUM CLIMAT Nice

UNE JOURNÉE UNIQUE D'ÉCHANGES
ENTRE PERSONNALITÉS POLITIQUES, SCIENTIFIQUES
ET CITOYENS ENGAGÉS

CHANGEMENT climatique & BIODIVERSITÉ

JEUDI NOV. 5 & 6 VENDREDI NOV.

Soirée Villa Massena

Journée Centre Universitaire Méditerranéen

INSCRIPTION GRATUITE ET PROGRAMME SUR forumclimatnice.com

#forumclimatnice

En partenariat avec

VILLE DE NICE · MÉTROPOLE NICE CÔTE D'AZUR · GENERALI · CCI PROVENCE ALPES CÔTE D'AZUR · MUSÉE MASSÉNA Nice · C.U.M.

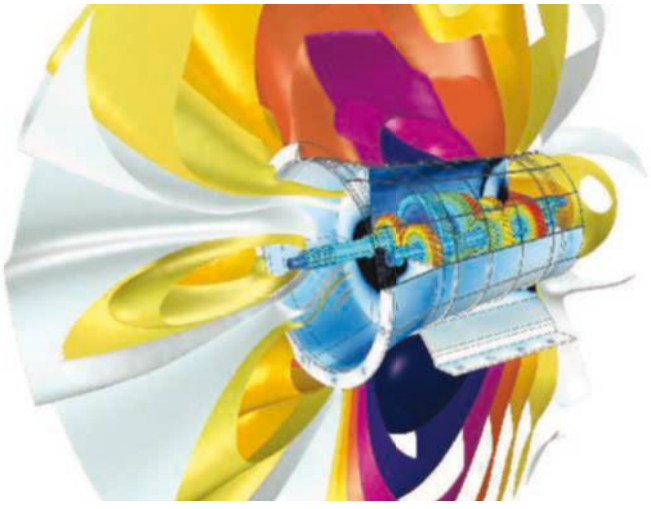
Partenaire Média

GROUPE nice-matin

Organisé par

Challenges · SCIENCES AVENIR · La Recherche · Les Echos Le Parisien ÉVÉNEMENTS

Des simulations de tests de bruit et vibrations que vous pouvez voir et entendre !



Visualisation du niveau de pression acoustique à l'extérieur de la boîte de vitesse et des contraintes de von Mises induites par les vibrations dans son carter.

L'approche la plus efficace pour réduire le rayonnement sonore d'une boîte de vitesses consiste à effectuer une analyse vibro-acoustique pour savoir comment en améliorer la conception. Les essais de bruit, vibrations (NVH) sont une partie importante du processus de conception et peuvent être simulés avec un logiciel multiphysique.

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des composants et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment vous pouvez l'appliquer pour la modélisation des vibrations et du bruit des boîtes de vitesses.

comsol.blog/NVH-simulation

COMSOL

PATRICE BLOT / SAIF IMAGES

Le nouvel instrument déploie ses 844 m de circonférence sur la Presqu'île de Grenoble, entre Drac et Isère.

Les défis du plus puissant synchrotron

Ouvert depuis le 25 août, l'accélérateur de particules grenoblois va scruter les matériaux et la matière vivante avec une résolution inégalée. En phase de tests, en avril, il a déjà pu révéler des lésions dans les poumons de personnes atteintes par le Covid-19.

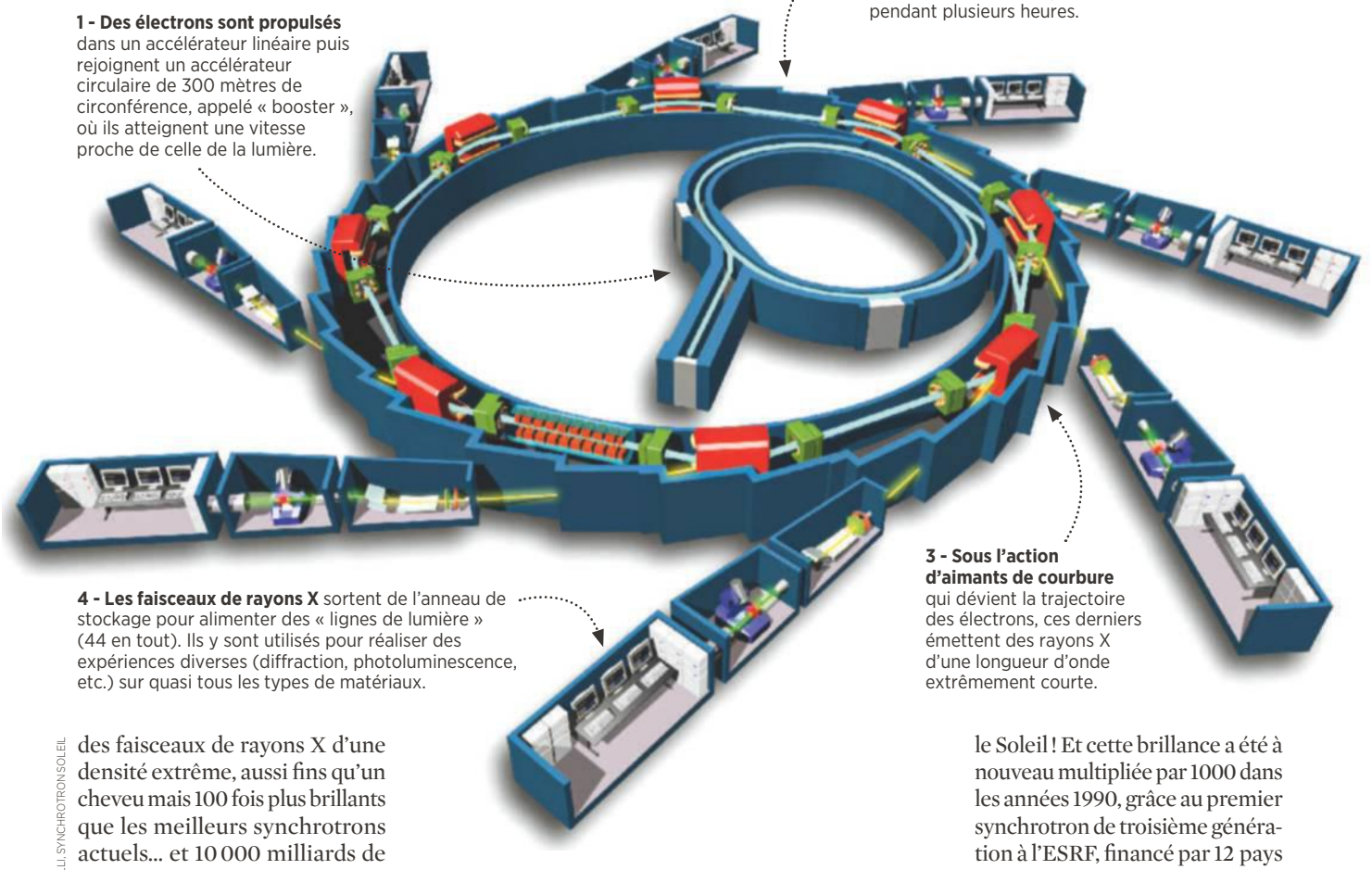
Par Franck Daninos @fdaninos

Scanner un moteur d'avion ou les restes fossilisés d'un tyrannosaure, « voyager » virtuellement à l'intérieur d'un cœur, scruter la palette chimique d'une toile de maître, observer le déroulement d'une réaction chimique millionième de seconde par millionième de seconde… Autant de défis que va relever le nouveau synchrotron de l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), société civile de droit français à financement international installée entre le Drac et l'Isère, sur la Presqu'île de Grenoble. Nommé EBS (*« Extremely Brilliant Source »*), cet instrument d'environ 900 mètres de circonférence et pesant plus de 2000 tonnes est ouvert depuis le 25 août à la communauté scientifique internationale. *« Il s'agit du premier synchrotron dit de quatrième génération et à très haute énergie*, se réjouit Jean Susini, directeur scientifique de l'ESRF. *Il permettra de caractériser la structure des matériaux et de la matière vivante de façon beaucoup plus qualitative, plus rapidement et avec une résolution inégalée. »* Preuve de son succès : alors que l'instrument était encore en phase de test et en raison de l'urgence sanitaire, l'EBS a permis de scanner en avril des poumons de personnes terrassées par le Covid-19, révélant la dégradation des alvéoles pulmonaires et des micro-vascularisations sur l'ensemble des organes. *« Les résultats seront publiés d'ici à quelques mois »*, confie le chercheur, probablement en octobre. Cette installation produit en effet

Quatre étapes pour produire des faisceaux de rayons X

1 - Des électrons sont propulsés dans un accélérateur linéaire puis rejoignent un accélérateur circulaire de 300 mètres de circonférence, appelé « booster », où ils atteignent une vitesse proche de celle de la lumière.

2 - Lorsque qu'ils atteignent une énergie de 6 gigaélectronvolts, les électrons sont injectés dans un anneau de stockage de 844 mètres de circonférence dans lequel ils tournent dans le vide pendant plusieurs heures.



3 - Sous l'action d'aimants de courbure qui dévient la trajectoire des électrons, ces derniers émettent des rayons X d'une longueur d'onde extrêmement courte.

4 - Les faisceaux de rayons X sortent de l'anneau de stockage pour alimenter des « lignes de lumière » (44 en tout). Ils y sont utilisés pour réaliser des expériences diverses (diffraction, photoluminescence, etc.) sur quasi tous les types de matériaux.

EPSIM 3D/JF SANTARELLI, SYNCHROTRON SOLEIL

des faisceaux de rayons X d'une densité extrême, aussi fins qu'un cheveu mais 100 fois plus brillants que les meilleurs synchrotrons actuels… et 10 000 milliards de fois plus intenses que les scanners utilisés dans le milieu hospitalier. On dénombre une cinquantaine de synchrotrons dans le monde, sur tous les continents habités à l'exception de l'Afrique. D'un coût de 300 millions à un milliard d'euros, ils affichent des performances diverses mais exploitent tous la même propriété : celle des particules chargées — des électrons notamment — à émettre des ondes lumineuses lorsque leur trajectoire est déviée par un champ magnétique. La longueur d'onde de ces rayonnements étant inversement proportionnelle à la vitesse des particules, à l'approche celle de lumière (300 000 km/s), ces dernières émettent des rayons X d'une longueur d'onde extrêmement courte : autour du dixième de milliardième de mètre. Très pénétrants car n'interagissant que partiellement avec la matière, ces rayons X sont utilisés depuis le début des années 1960 par les physiciens. Ceux-ci les ont d'abord exploités pour sonder l'organisation intime des solides ou des gaz à l'échelle moléculaire. Dans les années 1970, ont été construites des machines de deuxième génération, notamment à Orsay (Essonne). Leur « brillance » (flux de rayons X) atteint alors un million de milliards de particules par seconde et par centimètre carré, selon un angle donné. Soit 100 000 fois plus que le Soleil ! Et cette brillance a été à nouveau multipliée par 1000 dans les années 1990, grâce au premier synchrotron de troisième génération à l'ESRF, financé par 12 pays (ils sont 22 aujourd'hui) dont, en particulier, la France. *« Une telle brillance a été obtenue en propulsant des paquets d'électrons dans un anneau de stockage et en concentrant au maximum ces derniers dans le plan vertical »*, explique Jean-Louis Hazemann, physicien à l'institut Néel à Grenoble qui collabore étroitement avec l'ESRF. Associée à 44 « lignes de lumière » et autant d'équipements expérimentaux (diffraction des rayons X, photoluminescence, spectroscopies…), cette source de troisième génération a aussitôt fait des émules (États-Unis, Japon…) et élargi considérablement les applications. D'abord cantonnées à la physique et à la

992
Le nombre d'aimants qui permettent de confiner les électrons en rang extrêmement serré.

150 millions d'euros
Le coût de la transformation de l'ancien synchrotron en une nouvelle machine.

CÉCILE DUFLOT/IMPMC

INTERVIEW

CATHERINE VÉNIEN-BRYAN
PROFESSEURE DE BIOPHYSIQUE À SORBONNE-UNIVERSITÉ À PARIS ET PRÉSIDENTE DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES MICROSCOPIES

« Un gain immense pour identifier les futurs médicaments »

À quoi servira principalement ce nouveau synchrotron ?
Il radiographiera avec une finesse et une rapidité inégalées des objets aussi divers qu'un pneu de voiture, des végétaux contaminés par des métaux toxiques ou des momies égyptiennes. Presque toutes les disciplines scientifiques sont concernées, l'une d'entre elles étant prédominante : la biologie structurale, qui étudie l'architecture des macromolécules préalablement cristallisées — des protéines notamment — par diffraction des rayons X.

Pourquoi est-ce si important ?
L'activité des protéines est étroitement liée à leurs structures tridimensionnelles. Certaines d'entre elles, les enzymes, possèdent notamment des sortes de cavités où les molécules se logent avant d'être transformées en différents produits. Déterminer ces structures est donc indispensable pour comprendre les mécanismes biochimiques et concevoir des médicaments venant activer ou inhiber certaines protéines. Les laboratoires pharmaceutiques utilisent ainsi abondamment les rayonnements synchrotron. Ils cristallisent et analysent structurellement des milliers de substances pour identifier les plus prometteuses.

Qu'apportera de plus ce nouveau synchrotron ?
Ses performances décuplées permettront d'obtenir des architectures mieux résolues, plus nettes, jusqu'au centième de nanomètre près. Mais surtout, par rapport aux autres synchrotrons, elles offrent un gain immense en rapidité. Alors que plusieurs heures étaient jusqu'à présent nécessaires pour examiner une seule macromolécule, quelques minutes suffiront. Les laboratoires pourront analyser ainsi beaucoup plus de structures, liées aux changements de conformation des protéines en particulier, et proposer des réponses pharmaceutiques innovantes. Ils étudieront aussi plus facilement les objets qui se détériorent rapidement sous l'effet des rayons X, comme les protéines associées à l'ADN ou les virus. **Propos recueillis par F. D.**

L'étude du fossile de l'archéoptéryx avec le précédent synchrotron a déjà permis d'élucider la technique de vol de ce dinosaure à plumes.

chimie, elles se sont étendues à la biomédecine *(lire l'interview ci-contre)*, à la paléontologie, la géologie ou les sciences de l'environnement. Au cours des vingt-cinq dernières années, les 10 000 visiteurs annuels de l'ESRF ont ainsi produit 32 000 publications scientifiques et sont à l'origine d'importantes découvertes ! Parmi elles : la structure tridimensionnelle du ribosome, l'« *usine à protéines* » des cellules, saluée en 2009 par un prix Nobel ; la température du noyau terrestre (jusqu'à 5500 °C), obtenue grâce à l'analyse en 2013 d'échantillons de fer soumis à des pressions titanesques ; ou encore la technique de vol de l'archéoptéryx, dinosaure à plumes, élucidée en 2018 en scannant des fossiles vieux de 140 millions d'années.

Pour franchir un nouveau palier, l'ESRF a écarté la construction, très coûteuse, d'une nouvelle machine de plusieurs kilomètres de circonférence et élaboré une nouvelle stratégie dès 2015 : « *rendre les nappes d'électrons plus compactes encore en les concentrant dans le plan vertical mais aussi horizontal* », indique Jean-Louis Hazemann. Les électrons circuleraient alors en rang serré comme une seule particule ponctuelle… De quoi multiplier par 100 la brillance des faisceaux tout en conservant les dimensions et infrastructures de l'ancien instrument ! Un nouveau synchrotron, muni d'un millier d'aimants

PASCAL GOETGHELUCK / SCIENCE PHOTO LIBRARY

très puissants, s'est ainsi substitué à l'ancienne machine. Coût de l'opération : 150 millions d'euros. « *Ce synchrotron ouvre un nouveau terrain de jeu pour les scientifiques et des perspectives fascinantes !* », s'enflamme Étienne Bustarret, directeur de l'Institut Néel. Elle permettra, en particulier, d'observer des phénomènes dynamiques extrêmement rapides et à très petite échelle, « *comme les processus de charge et de décharge d'une batterie au voisinage des électrodes, essentiels pour les industriels, ou les changements de conformation des catalyseurs chimiques lorsqu'ils se détériorent au cours du temps* », précise Étienne Bustarret.

Une autre application remarquable concerne l'imagerie médicale. Comme l'ont montré les images des poumons atteints par le Covid-19, les chercheurs pourront « zoomer », grâce au flux de lumière extrêmement intense, à l'intérieur même des organes, pour en explorer les moindres recoins et observer des détails de plus en plus fins jusqu'au niveau... de la cellule. Et il y a foule à la porte : « *1250 demandes d'utilisation ont d'ores et déjà été déposées pour le deuxième semestre 2020 !* », se félicite l'expert. Un plébiscite. ■

ANALYSES NON INVASIVES

Lumière sur les matériaux anciens

Comme son prédécesseur, le nouveau synchrotron de l'ESRF va jouer un rôle déterminant dans l'étude des fossiles et des objets du patrimoine. « *Depuis le milieu des années 2000, les synchrotrons sont devenus quasi indispensables dans ce domaine de recherches, menées à l'ESRF mais aussi à Saclay, dans l'Essonne, avec le synchrotron Soleil* », précise Loïc Bertrand, coordinateur du réseau francilien de recherche consacré à l'étude des matériaux anciens. Les rayons X qu'ils émettent permettent d'exalter le contraste d'objets composites et de distinguer les structures d'origine biologique des sédiments où ces dernières se sont minéralisées. De manière non invasive, les chercheurs obtiennent ainsi des reconstitutions très nettes et tridimensionnelles des morphologies (crânes, ailes, nageoires, organes internes, etc.), inestimables pour comprendre l'évolution des espèces. « *Le nouveau synchrotron de l'ESRF produira des images encore mieux résolues et à différentes échelles, de plusieurs dizaines de centimètres jusqu'à quelques nanomètres* », se réjouit Loïc Bertrand. Ses rayons X extrêmement intenses révéleront aussi, dans des tableaux anciens par exemple, la nature chimique de molécules et atomes présents en très faible quantité. « *On comprend ainsi quel pigment ou quelle technique picturale ont été utilisés et comment conserver au mieux les œuvres d'art* », explique le physicien. Des microéchantillons de tableaux de Rembrandt (*Bethsabée*) et de Léonard de Vinci (*La Vierge, l'Enfant Jésus et sainte Anne*) passeront bientôt l'examen du nouveau synchrotron de Grenoble.

RAFFAEL / LEEMAGE

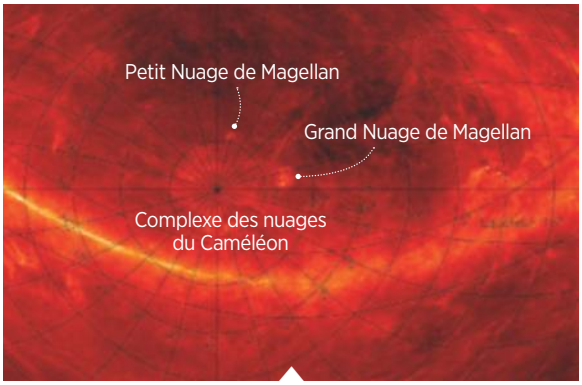
« La Vierge, l'Enfant Jésus et sainte Anne », de Léonard de Vinci, sera bientôt étudié avec le nouveau synchrotron.

Un grand mur dans le ciel austral enrichit la carte du cosmos

Une gigantesque structure composée de milliards de galaxies et qui attire notre Voie lactée a été découverte en direction du pôle Sud de la Terre. Preuve supplémentaire de l'organisation de la matière à l'échelle cosmologique en immenses espaces denses côtoyant des vides.

Personne ne l'avait repéré aux confins du cosmos. Alors qu'elle explore depuis plusieurs années d'immenses contrées célestes encore inconnues, une équipe internationale l'a vu se dresser devant elle — du moins sur ses modèles informatiques : un gigantesque mur long de plus de un milliard d'années-lumière ! Tissée de milliards de galaxies, cette gigantesque structure est située au « pôle Sud céleste », autrement dit dans la direction du pôle Sud de la Terre. De quoi compléter la carte du cosmos dont les chercheurs — parmi lesquels Daniel Pomarède, de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu) du CEA (Saclay, Essonne), et Hélène Courtois, de l'université Claude-Bernard de Lyon — commencent à dessiner les fascinants contours.

C'est en scrutant derrière de très épais nuages moléculaires qui en masquaient l'existence que les astrophysiciens ont débusqué ce « super-mur ». Et ce n'est pas un hasard ! Car ces chercheurs sont déjà à l'origine, en 2014, de l'extraordinaire mise en évidence de Laniakea, le superamas de galaxies auquel appartient la nôtre, la Voie lactée (*lire* S. et A. *n° 813, novembre 2014*). Certes, ce n'est pas le premier « mur » ainsi dévoilé aux regards, mais c'est de loin le plus majestueux. Depuis une trentaine d'années en effet, les scientifiques découvrent peu à peu les grandes structures que forment les galaxies à l'échelle cosmologique. Toutes se répartissent en longs filaments qui se rejoignent en nœuds, plaques ou murs de matière, séparés par de grands vides. Ainsi du Grand Attracteur révélé en 1987, une région de forte densité située au cœur de Laniakea qui contient des dizaines de milliers de fois la masse de notre Voie lactée ; du Grand Mur du CfA (Harvard-Smithsonian Center for astrophysics), qui recèle les amas de galaxies d'Hercule et de la Chevelure de Bérénice (1989) ; du Grand Mur de Sloan (2003), situé à 1 milliard d'années-lumière et qui ressemble davantage à un filament ; ou encore du Grand Mur de Boss, cinq fois plus éloigné (2016). Le Grand Mur du pôle Sud, aujourd'hui découvert, est quant à lui deux fois plus près de notre galaxie que celui de Sloan.



Notre vision du ciel vers le pôle Sud est gênée par le disque de gaz et de poussières de notre galaxie (grande bande jaune) mais aussi par d'immenses nuages denses comme ceux du Caméléon. D'où la difficulté à voir les grandes structures se trouvant au-delà.

Pour trouver, les chercheurs ont dû innover

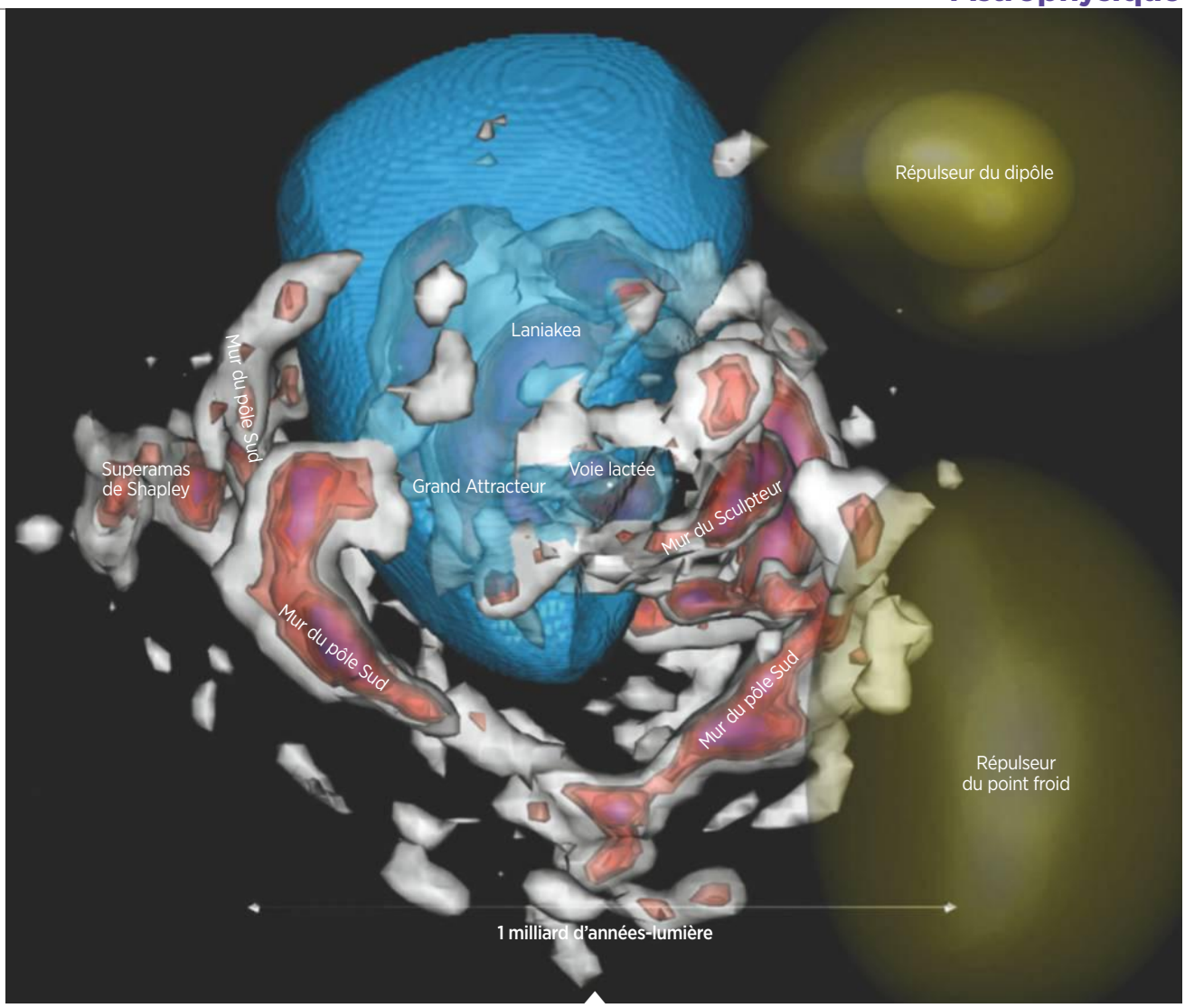
« *Il était caché derrière un complexe de nuages moléculaires dans la constellation du Caméléon* », explique Daniel Pomarède, non loin des Nuages de Magellan, les deux galaxies satellites de la Voie lactée qui sont, elles, visibles à l'œil nu depuis l'hémisphère Sud. Pour réaliser ces exploits, à chaque équipe sa méthode ! Ainsi, le mur de Boss a-t-il été identifié en observant les quasars lointains. Une partie de leur lumière étant

D. POMARÈDE, R. BRENT TULLY, R. GRAZIANI, H. COURTOIS, Y. HOFFMAN, J. LEZMY

D. POMADÈRE

« Il était caché derrière un complexe de nuages moléculaires dans la constellation du Caméléon »

Daniel Pomarède, astrophysicien à l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu) du CEA, Saclay (Essonne)



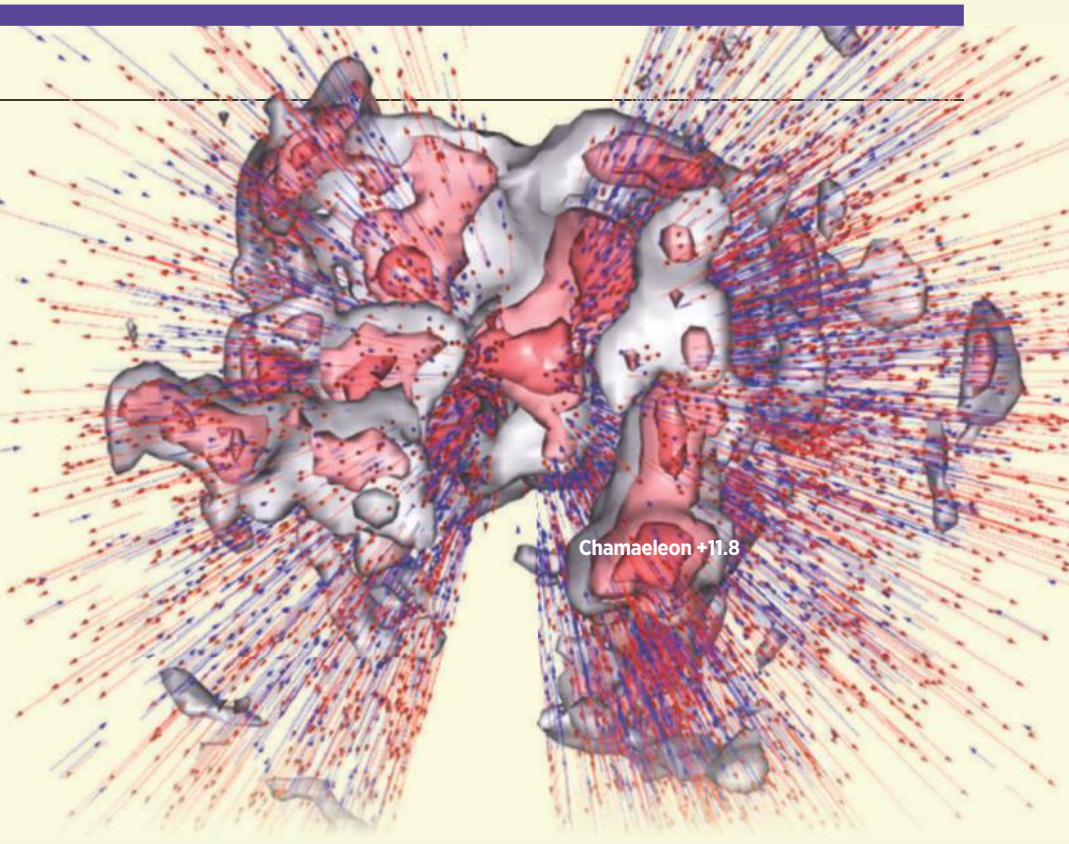
D. POMARÈDE,R. BRENTTULLY,R.GRAZIANI, H.COURTOIS, Y.HOFFMAN, J. LEZMY

Notre environnement cosmologique proche est dominé par de grandes structures comme le superamas Laniakea auquel nous appartenons ou le superamas de Shapley, mais aussi par un long filament de matière qui s'étend en arc de cercle, le Mur du pôle Sud qui vient d'être découvert. Ces espaces denses sont entourés de vides comme le Répulseur du dipôle ou le Répulseur du point froid.

absorbée par « quelque chose » se trouvant sur la ligne de visée, c'est ainsi que la présence de cette vaste structure de matière a été supposée. Quant au mur de Sloan, il a été déduit de la position des millions de galaxies, une grande partie d'entre elles étant concentrées dans cette grande structure de matière. Mais l'équipe de Daniel Pomarède a dû innover ! Impossible en effet pour elle d'utiliser ces deux méthodes en raison de la présence des nuages moléculaires qui empêchent de voir à travers. « *Les chercheurs ont donc choisi de mesurer la vitesse de déplacement et la position des galaxies puis de reconstituer la quantité de masse qui les attire. Cela fonctionne bien, même si on ne peut pas "voir" directement cette dernière* », analyse la Finlandaise Heidi Lietzen, à l'origine de la découverte du mur de Boss. Pour ce faire, ils ont tout d'abord sélectionné 17 669 galaxies dont ils ont donc calculé aussi bien la vitesse que la distance. La première a été obtenue en examinant le changement de couleur propre aux objets qui s'éloignent de l'observateur, le fameux décalage vers le rouge de leur lumière (effet Doppler) et ont obtenu le résultat pour chacune en enlevant la part due à l'expansion de l'Univers. Les distances ont quant à elles été déduites du rapport entre la luminosité apparente de certaines étoiles et leur luminosité absolue, mais aussi du rapport entre le rayon, la brillance et la vitesse des étoiles centrales de certaines galaxies elliptiques. Les chercheurs ont notamment puisé dans le catalogue australien 6DF (*Six Degrees Field*) recensant 10 000 galaxies issues des observations effectuées au radiotélescope de Parkes et au télescope optique de Siding Spring (Aus-

TECHNOLOGIE

Une cartographie dynamique



D. POMARÈDE, R. BRENT TULLY, R. GRAZIANI, H. COURTOIS, Y. HOFFMAN, J. LEZMY

Contrairement aux cartes statiques comme celles obtenues par le programme Sloan — à l'origine de la découverte du mur cosmique du même nom — en positionnant des millions de galaxies, celle qui a permis la mise en évidence du Grand Mur du pôle Sud est dynamique. Construite à partir des vitesses propres des galaxies (vitesse observée moins la vitesse due à l'expansion de l'Univers), elle montre celles qui s'éloignent de nous *(ci-contre flèches rouges)* et celles qui se rapprochent *(flèches bleues)*. Dans la cartographie du champ de matière ainsi obtenue apparaissent des pics de densité : les chercheurs donnent aux régions associées à ces pics le nom de la constellation à laquelle elles appartiennent, suivi d'un signe positif (+) s'il s'agit d'une surdensité ou négatif (-) si c'est plutôt un vide. Le tout complété par la vitesse observée, mesurée en milliers de kilomètres par seconde. Ainsi au centre du Grand Mur, dans sa partie la plus australe, se trouve la concentration Chamaeleon+11.8. Située dans la constellation du Caméléon (*Chamaeleon* en anglais), elle s'éloigne de nous à 11 800 km/s. C'est à partir d'un tel relevé qu'est apparue la structure cachée du Grand Mur du pôle Sud.

tralie). L'équipe a ensuite reconstruit un champ dynamique qui a permis de déterminer les endroits vides ou presque, et d'autres où la densité de matière est plus forte *(lire l'encadré ci-dessus)*. Petit à petit, les calculs ont ainsi dévoilé les contours du Grand Mur du pôle Sud qui attire notre galaxie, la Voie lactée, vers lequel elle se dirige inexorablement.

Avec cette carte, notre environnement cosmologique proche commence à être mieux cerné ainsi que ses dynamiques. Le groupe local auquel appartient la Voie lactée, la galaxie d'Andromède et leurs satellites se dirigent ainsi bien à 630 km/s vers le Grand Attracteur, lieu le plus dense du superamas Laniakea. Notre galaxie se situe aussi au bord d'un endroit quasi vide, appelé le Vide local, lui-même étant placé non loin d'un autre espace vide, beaucoup plus imposant, nommé le « Répulseur du dipôle » et découvert par la même équipe en 2017. Cet espace est dit répulsif car même si aucune force gravitationnelle négative ne rejette la matière, la somme des attractions dues à la répartition des masses fait comme si les endroits peu denses repoussaient les galaxies qui en sont proches. Enfin, aux frontières sud de Laniakea, s'étend donc le Mur du pôle Sud qui forme un arc de-cercle enlaçant le superamas. Cependant, cette nouvelle carte cosmologique n'est pas encore complète. Toutes les structures n'ont pas encore été reconnues. En particulier, il reste à cartographier celles cachées derrière le plan de la Galaxie, ce que les astrophysiciens appellent la zone d'obscuration galactique qui occupe tout de même une bande de 360° par environ 20° dans le ciel. Un « trou » que l'équipe compte combler en utilisant la même méthode de reconstruction indirecte. *« Notre prochain travail sera d'inclure les galaxies observées depuis l'hémisphère Nord avec les radiotélescopes de Green Bank en Virginie-Occidentale (États-Unis) et d'Arecibo à Porto-Rico afin de découvrir les structures existantes plus au nord, près du Répulseur du dipôle »*, se réjouit déjà Daniel Pomarède. ■ **Jacques-Olivier Baruch**

POUR EN SAVOIR PLUS

▸ La vidéo détaillant la découverte du Grand Mur du pôle Sud : **sciav.fr/883grandmur**

SCIENCES FONDAMENTALES
Planétologie

GRAU GALOFRE/ASU

Les canaux sous-glaciaires de l'île Devon, au Canada (ci-dessus), présentent des similitudes avec les dépressions de l'hémisphère sud martien.

Mars aurait eu une jeunesse glacée

Une étude sur 10 000 vallées martiennes contredit l'hypothèse d'une planète chaude avec des rivières coulant à sa surface.

Il y a environ 3,8 milliards d'années, une vaste partie de l'hémisphère sud de Mars devait être recouverte par une calotte glaciaire. C'est cette représentation de la planète Rouge radicalement différente des modèles traditionnels que propose Anna Grau Galofre, ancienne doctorante à l'université de Colombie-Britannique (Canada) et aujourd'hui à l'université d'État de l'Arizona (États-Unis). Depuis une quarantaine d'années, l'hypothèse en vogue veut en effet que, dans sa jeunesse, Mars fût chaude et humide et que de nombreuses rivières coulassent à sa surface.

Vue de loin, la planète semble divisée en deux : son hémisphère nord est occupé par une vaste plaine presque lisse tandis que le sud est couvert de cratères, rappelant plutôt la surface de la Lune. Vue de près, cette dissymétrie est encore plus flagrante avec, au sud, un vaste réseau de vallées sur des terrains vieux de plus de 3,7 milliards d'années. Ce sont ces milliers de dépressions qui évoquaient l'existence passée de rivières. Mais selon Anna Grau Galofre, à l'époque, le jeune Soleil brillait avec moins d'intensité et le climat de la planète Rouge était bien plus froid qu'aujourd'hui. De plus, avec son équipe, elle a remarqué de frappantes ressemblances entre certaines vallées martiennes et les canaux sous-glaciaires de l'île Devon dans l'archipel Arctique canadien.

La vie aurait pu en être favorisée

Motivés par ce constat, les scientifiques ont analysé, à l'aide d'un nouvel algorithme, la structure de quelque 10 000 vallées martiennes pour en comprendre les processus de formation. Verdict : la majorité d'entre elles n'ont pas été creusées par des rivières en surface mais se sont formées sous de la glace par l'action des canaux drainant de l'eau fondue ! Paradoxalement, ce nouveau tableau de Mars pourrait aller dans le sens d'une vie passée : la couche de glace aurait pu apporter stabilité et protection à l'eau sous-jacente, offrant ainsi des conditions idéales à son essor. ■

Joël Ignasse @IgnasseJ

AURÉLIEN ALVAREZ

La Recherche
Maths

PAR AURÉLIEN ALVAREZ *

Des tableaux virtuels en complément des tableaux à la craie

Mars 2020. Le tourbillon quotidien a laissé place à un étrange calme. S'en est suivi un flot d'annulations de presque tous les événements laissant un agenda vide et un horizon de temps devant soi. Quel bonheur pour un mathématicien, non ? Du temps et du temps disponible pour travailler. Après l'euphorie des premiers instants, il a fallu faire face à des réalités comme donner ses cours à distance. Ayant le privilège de travailler avec un tout petit nombre d'étudiants très autonomes, la tâche fut relativement facile et l'expérience plutôt enrichissante. Mais de nombreux collègues, dans le supérieur et encore plus dans le secondaire, ont dû faire face à des situations hautement plus périlleuses et à un décrochage de nombreux élèves. Puis les séminaires de recherche ont repris... à distance. Les conférences ont été reprogrammées... à distance. Pensez à tous ces mathématiciens privés du plaisir d'écrire de belles formules à la craie sur leurs tableaux noirs. Mais imaginez aussi qu'il leur a été possible d'écouter un séminaire ou un exposé d'une conférence ayant lieu à l'autre bout de la planète sans sortir de chez eux. S'il serait terrifiant d'envisager désormais de tout programmer à distance, une catastrophe certaine pour l'enseignement des mathématiques, il serait sûrement dommage de ne pas chercher à mieux comprendre le potentiel de ces outils en complément des outils traditionnels. Qu'apprend-on le mieux en ligne, en cours, en stage, d'un enseignant, d'un pair, d'une expérience ? Ces problématiques ne sont pas nouvelles mais, plus que jamais, nous avons besoin de recherches concernant l'évolution des systèmes d'apprentissage et ce qu'il convient d'enseigner. Et il ne faudrait pas s'étonner que les réponses soient très différentes d'une discipline à l'autre. ■

> « Nous avons besoin de recherches concernant l'évolution des systèmes d'apprentissage et ce qu'il convient d'enseigner »

* Professeur à l'ENS de Lyon

L'art celte magnifié

Une exposition sur le site archéologique de La Tène, en Suisse, dévoile la richesse et l'inventivité des artisans celtes.

Par Bernadette Arnaud @NarudaaArnaud

Torque en or (vers 380 avant J.-C.) mis au jour à Erstfeld, en Suisse.

L'ÉVÉNEMENT EST EXCEPTIONNEL. Pour la première fois, les amoureux de la culture celte vont pouvoir admirer plus de 200 objets témoignant de la richesse de cette civilisation qui a dominé l'Europe, de la Hongrie à l'Espagne et à la Grande-Bretagne. Et surtout, battre en brèche quelques-unes des idées reçues sur cette nébuleuse de peuples dont la créativité a été déniée jusqu'au XX^e siècle. « *Le meilleur moyen pour approcher les Celtes n'est-il pas d'accéder à leur univers mental ?* », interroge Marc-Antoine Kaeser, commissaire de l'exposition « Celtes, un millénaire d'images » du parc et musée archéologiques du Laténium à Hauterive près de Neuchâtel (Suisse). Celle-ci rassemble en effet des trésors provenant du Musée archéologique de Munich (Allemagne) et de prêts exceptionnels provenant de Suisse, d'Italie et de Slovaquie*. « *Il y a chez les Celtes une idée extraordinaire, celle d'enchanter le quotidien*, poursuit l'archéologue. *Un univers ou le sacré et le surnaturel imprégnaient tout.* » L'occasion de redécouvrir un monde fascinant avec des yeux neufs.

Quatre torques et trois bracelets en or provenant d'Erstfeld (Suisse) datés de 380 avant J.-C. témoignent en particulier de l'exceptionnelle inventivité des orfèvres celtes et annoncent les fastes qu'atteindront plus tard leurs créations. Ils ont été découverts en 1962 dans un dépôt rituel situé sur la voie du col du Gothard, un axe qui relie depuis toujours l'Italie et le monde méditerranéen à l'Europe transalpine. Projetés sur de grandes parois murales du Laténium, les motifs de ces bijoux semblent s'entremêler dans un mouvement infini. « *Tous ces objets destinés à être portés ne se comprennent que dans le dynamisme* », explique Marc-Antoine Kaeser. La métamorphose est en effet stupéfiante : ce qui était un décor végétal semble soudain se transformer en un œil, puis en

J. ROETHLISBERGER - LATÉNIUM

« Il y a chez les Celtes une idée extraordinaire, celle d'enchanter le quotidien »

Marc-Antoine Kaeser, archéologue, directeur du Laténium et professeur associé à l'université de Neuchâtel, Suisse

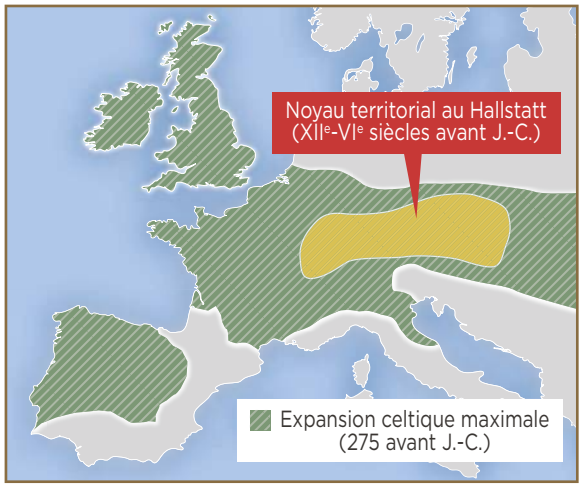
Clavettes d'essieu de char ornées de têtes de rapaces (chouette et faucons), en bronze sur tige de fer avec incrustation d'émail rouge sur la tête du faucon (à gauche) (Ier siècle avant J.-C., Manching, Allemagne).

PHOTOS : MUSÉE NATIONAL SUISSE, ZURICH, A. MAILLIER, BIBRACTE /MUSÉE ARCHÉOLOGIQUE DE MUNICH

un animal avant de devenir une tête humaine. « *Tout est fluide, et passe instantanément d'une forme à l'autre* », poursuit le spécialiste. Ici, pas d'ordres, pas de catégories mais des glissements, des mues incessantes… « *Ce changement d'état des motifs, cette plasticité, cette décomposition des formes sont l'un des plus grands trésors d'inventivité de la culture celtique que l'on a longtemps méconnus.* »

Une habileté à jouer avec les formes et la lumière

Ce n'est en effet que tardivement, au milieu du XXe siècle, que les travaux des spécialistes ont permis d'effacer peu à peu l'image de Barbares accolée aux Celtes pour lui substituer celle d'un peuple de créateurs à l'imagination fertile et dont l'habileté à jouer avec les formes et la lumière ne cesse depuis de fasciner. Ce n'est d'ailleurs pas un hasard si c'est en bordure du paisible lac de Neuchâtel que ces objets ont trouvé un écrin. C'est à cet endroit même que s'élevaient de vastes cités lacustres il y a plus de 3000 ans, ainsi que le site majeur de La Tène qui a donné son nom au laténien, le second âge du fer européen (450 à 25 avant J.-C.), la période considérée comme l'apogée de la culture celtique. Celle-ci succède à la culture de Hallstatt (dont le site éponyme se trouve en Autriche) ou premier âge du fer, apparue dès 800 avant J.-C., juste après les temps reculés du bronze final, temps reculés dans lesquels le monde celte semble plonger ses racines. Des chenets en argile remontant au XIIIe siècle avant notre ère constituent ainsi une des toutes premières traces de ces expressions artistiques : leur forme en cornes de taureau ou en croissants de lune rappelle les bucranes (têtes de bœuf) et on pourrait penser qu'ils viennent tout droit du Proche-Orient tout comme ces objets en bronze en forme de rouelles qui pourraient être des représentations solaires. « *L'art celtique n'est absolument pas naturaliste. Quand on représente un animal, il ne faut pas y*



BRUNO BOURGEOIS

Les fouilles de La Tène, en 1907, en Suisse, ont révélé la richesse de la civilisation celtique à son apogée (Ve-Ier siècle avant J.-C.).

Coupe à décor géométrique peint à l'hématite provenant du site hallstattien de Schirndorf, en Allemagne (VIIe siècle avant J.-C.).

voir la créature, mais l'essence de la vertu qu'elle incarne », insiste Marc-Antoine Kaeser. Ainsi, de ce sanglier en bronze surmonté d'une crête en volutes d'argent, symbole de puissance. Là encore, rien de figé : les motifs se laissent deviner comme cette fascinante tête de chouette stylisée nichée dans un essieu de char ou ces joueurs de lyre qui apparaissent sous forme de pointillés sur des céramiques : s'animaient-ils le soir, à la lueur des flammes des foyers ? « *Pour produire ces objets, les Celtes ont fait un recours massif à la technique de la cire perdue, poursuit le directeur du Laténium* (lire l'encadré p. 51). *Cette technique ne pouvait produire que des objets uniques : il y a de fait chez les Celtes une absence absolue de canon, chaque œuvre étant une réalisation originale.* » Un caractère d'exception retrouvé également sur les lames et les fourreaux d'épées avec leurs décors d'entrelacs. « *L'investissement symbolique était majeur sur toutes ces productions individuelles, qu'il s'agisse d'armes ou d'objets du quotidien* », poursuit Marc-Antoine Kaeser, qui regrette que le temps n'ait laissé aucune trace des créations en matières périssables, cuir ou bois, dont les Celtes ont sans doute été prolifiques. Les décors contribuaient à l'efficacité de la fonction de chaque objet, renforçant ainsi la force et la valeur des guerriers : « *On peut parler pour les Celtes d'un art performatif.* »

Les productions celtes métalliques ont d'abord été réalisées en bronze, du XIIIe au IXe siècle avant J.-C. Les matières premières nécessaires à la composition de cet alliage — cuivre et étain — n'étaient pas disponibles localement, les mines dont ils proviennent étant situées à des distantes importantes à travers l'Europe. Le modèle économique et commercial reposait alors sur ces échanges lointains. Puis vers le VIIIe siècle avant J.-C. — époque contemporaine de la fondation

Extrémités richement ornées de fourreaux d'épées en fer (IIIe siècle avant J.-C., La Tène, Suisse) et épée en fer avec incrustations en or représentant des astres (à droite) (Ve-IIIe siècle avant J.-C., Munich, Allemagne).

PHOTOS : J. ROETHLISBERGER/LATÉNIUM, M. EBERLEIN/ MUSÉE ARCHÉOLOGIQUE DE MUNICH

Chenets en terre cuite en forme de croissants de lune (ou de cornes) sans doute liés à des cultes du foyer domestique (XIe-IXe siècle avant J.-C., Suisse).

Cratère à protomé en tête de taureau (VIIe siècle avant J.-C., Kosariska, Slovaquie).

PHOTOS : LATÉNIUM/MUSÉE ARCHÉOLOGIQUE DE MUNICH, M. JUILLARD/LATÉNIUM, S. MARTINS/MUSÉE ARCHÉOLOGIQUE DE FRANCFORT

mythique de Rome —, les données archéologiques indiquent une surexploitation des terres, en même temps qu'une rupture d'approvisionnement en cuivre et en étain, y compris dans le monde gréco-romain. Un effondrement économique, accompagné d'une très nette dégradation climatique, est alors perceptible. Ainsi, dans la région de La Tène, une accentuation du froid et de la pluviosité a fait monter partout le niveau des eaux des lacs et ont diminué la productivité agricole. En moins de deux générations, la population se réduit drastiquement et les grands villages littoraux sont abandonnés au profit de fermes distantes les unes des autres, à l'intérieur des terres. Paradoxalement, cette récession économique va stimuler l'émergence de la métallurgie du fer ! L'approvisionnement en cuivre et étain n'étant plus garanti, le recours à ce nouveau métal bouleverse toute la production.

Des réalisations de plus en plus prestigieuses

« Parce qu'il leur a fallu trouver de nouvelles solutions, les Celtes ont inventé des fours plus performants, avec l'utilisation d'un matériau plus efficace dont des gisements se trouvaient un peu partout à l'échelle de l'Europe », explique Marc-Antoine Kaeser. Vers 600 avant J.-C., apparaît ainsi une nouvelle aristocratie, celle des « princes » celtes du Hallstatt final, avec leurs riches tumulus, avant que des bouleversements politiques ne surgissent à nouveau avec la culture de La Tène (450 avant J.-C.), au second âge du fer. *« À partir du IIe siècle avant J.-C., les artisans celtes vont peu à peu s'éloigner de ce qui faisait leur spécificité, à savoir l'investissement dans toutes sortes de matériaux et d'objets du quotidien. Les productions artistiques ne vont plus concerner que des réalisations de prestige »*, explique l'archéologue. Apparaît alors du mobilier de grande valeur avec des objets en or, en argent et en verre. Les Celtes deviennent également maîtres dans un nouvel art, celui des monnaies, avec des créations jamais vues jusqu'alors.

Avec l'émergence des grandes agglomérations, à l'instar de Manching (Allemagne) — la plus grande connue — ou Bibracte, la capitale des Éduens bâtie sur le mont Beuvray dans le Morvan, les productions deviennent massives. L'homogénéisation culturelle à l'échelle de l'Europe est en marche, bien avant la conquête de la Gaule par les Romains (58-51 avant J.-C.) dont l'art classique aura raison des productions locales. *« Le changement culturel a précédé les transformations politiques »*, conclut le spécialiste. ■

Figurine de sanglier en bronze avec crête en argent (IIe siècle avant J.-C., sud-est des Alpes).

R.FRESE/MUSÉE ARCHÉOLOGIQUE DE MUNICH

SAVOIR-FAIRE

Une technique de moulage pour des objets uniques

La technique de la cire perdue, connue au moins depuis 6000 ans, est un procédé de moulage. Pour produire une sculpture, un modèle était tout d'abord façonné en cire, avant d'être enveloppé d'un moule modelé en terre. Une fois la cire fondue à l'intérieur de cette matière réfractaire portée au feu, les artisans celtes faisaient couler l'alliage de cuivre et d'étain en fusion dans le moule durci afin qu'il en épouse la forme. Une fois l'objet solidifié, le moule était brisé et ne pouvait plus être réutilisé.

* Mise en œuvre dans le cadre du réseau international « Iron Age Europe », l'exposition « Celtes, un millénaire d'images » est présentée au Laténium, parc et musée d'archéologie à Hauterive (Neuchâtel, Suisse) jusqu'au 10 janvier 2021.

Le passé des vieilles poteries s'éclaire

Avec la nouvelle méthode de recherche de « molécules spécifiques », l'archéologie se dote d'un puissant outil supplémentaire de datation des objets. Tour d'horizon des différentes techniques déjà utilisées.

C'est dans les vieux pots qu'on fait les meilleures méthodes de datation. Preuve en est avec celle publiée début avril dans la revue *Nature* par une équipe de l'université de Bristol (Royaume-Uni). Utilisée sur plusieurs centaines de fragments de poteries datant du début du néolithique retrouvés sur des sites de Grande-Bretagne et d'Afrique saharienne ainsi qu'en Europe de l'Ouest et centrale, cette nouvelle méthode a permis de les dater avec une précision inégalée. La base de la technique — qui vient d'être encore affinée en août — est pourtant connue et reconnue depuis des décennies puisqu'il s'agit de celle fondée sur la mesure du radiocarbone, ou carbone 14 (^{14}C).

La nouveauté de la méthode de l'équipe britannique, c'est qu'elle s'appuie sur la recherche par ^{14}C de deux acides gras spécifiques de la viande et du lait dans des céramiques anciennes ayant contenu ces aliments. Car, jusqu'à présent, les archéologues, pour déterminer l'âge de poteries, devaient essentiellement se fier aux dates obtenues sur les différents restes organiques, des ossements par exemple, enterrés avec la vaisselle. Une datation indirecte donc. La nouvelle méthode permet, elle, de dater directement ces ustensiles ayant accompagné les pérégrinations humaines depuis au moins 20 000 ans *(lire l'encadré ci-dessus)*. « *La datation sur les acides gras s'inscrit dans la continuité de ce qui avait été entrepris, dans les années 1990 au Royaume-Uni, par les laboratoires d'Oxford puis de Bristol*, retrace Christine Hatté, géochimiste au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CEA, CNRS, UVSQ, Gif-sur-Yvette). *Cela consistait alors à dater les lipides ayant été contenus dans les récipients. Mais il en fallait des quantités importantes, ce qui limitait considérablement son utilisation. La nouveauté est ici d'avoir raffiné la méthode, en se concentrant sur le niveau moléculaire (plutôt que de prendre tous les lipides). Obtenir deux dates de façon indépendante sur deux molécules différentes permet de fiabiliser le résultat.* »

Revers de la médaille : « *La contamination des "artefacts"* [objets fabriqués par l'humain] *devient alors plus grande*, nuance la chercheuse. *D'où l'importance de mettre en place également un protocole analytique afin de démêler les résultats.* »

Avec la datation ^{14}C sur des molécules spécifiques, l'archéologie se dote d'un outil supplémentaire. Mais, si le grand public connaît surtout la méthode du carbone 14, il en existe plusieurs autres, en fonction du site de fouilles, de son ancienneté, du type de vestiges qu'on y trouve, etc. Tour d'horizon. ■

Hervé Ratel

R. EVERSHED ET AL.

DATATION PAR MOLÉCULES SPÉCIFIQUES

Deux résidus alimentaires

À partir de résidus alimentaires incrustés dans de la vaisselle préhistorique, les chercheurs ont séparé différents acides gras, ce qui leur a permis de mettre au point la technique dite de recherche de « molécules spécifiques ». Ils ont choisi d'en conserver deux, résistants au temps et caractéristiques d'aliments comme la viande ou le lait. Puis, utilisant la puissance de l'« outil carbone 14 », ils ont pu en estimer l'âge et donc des poteries les ayant contenus *(ci-dessus, bol datant du néolithique, Somerset, Royaume-Uni)*. En expérimentant et en calibrant sa méthode sur des sites bien connus, l'équipe a ainsi vérifié que la marge d'erreur n'excède pas une centaine d'années. D'autres molécules spécifiques peuvent donner des informations sur d'autres vestiges archéologiques, par exemple l'hydroxyproline pour l'os.

De quelques siècles à plus de 55 000 ans

AKG IMAGES

LE CARBONE 14

C'est la reine des méthodes, en tout cas la plus connue, car elle possède une large gamme d'utilisation. *« C'est bien simple*, dit Christine Hatté, spécialiste de la technique au CEA/CNRS, *elle permet de dater tout ce qui contient du carbone : charbon, bois, peintures rupestres* [ici celles de la grotte d'Altamira en Espagne, datées de -15 500 à -13 500 ans], *ossements, coquillages, granules de vers de terre, le vernis des violons, certains colorants de peintures historiques… »* Certains atomes contenus dans un objet se désintègrent au cours du temps. La quantité de ^{14}C diminue ainsi de moitié tous les 5730 ans. En comptant le nombre d'isotopes ^{14}C restant dans un morceau de bois, on en déduit le temps qui s'est écoulé depuis la mort de l'arbre.

De 100 000 ans à 10 millions d'années

AKG IMAGES

LE POTASSIUM-ARGON

Utilisée pour tout ce qui est d'origine volcanique, cette méthode mesure les quantités de certains isotopes du potassium (^{40}K) ainsi que de l'argon (^{40}Ar) emprisonnés dans les roches issues d'éruptions. Comme le potassium 40 se transforme au cours du temps en argon 40, mesurer les proportions respectives de ces deux isotopes permet d'estimer l'âge d'une strate d'occupation humaine en datant les couches volcaniques au-dessus et en dessous *(ici des empreintes d'hominidés datées de -3,7 à -3 millions d'années sur le site de Laetoli, Tanzanie)*. Elle s'emploie également pour les carottes sédimentaires. Une technique dérivée, fondée sur le rapport argon 39/argon 40, s'applique à des époques plus récentes.

De 10 000 à 500 000 ans

ERIC CABANIS/AFP

L'URANIUM-THORIUM

Comme toutes les méthodes isotopiques, elle exploite le déséquilibre à un instant donné entre deux atomes constituant un objet. En l'occurrence, l'uranium 234 présent dans l'eau qui s'incorpore à l'exosquelette des coraux, aux coquillages ou à la calcite recouvrant la paroi d'une grotte, et qui va progressivement se désintégrer en thorium 230, absent lors de la formation du matériau. Le rapport entre les isotopes mesuré à l'aide d'un spectromètre de masse permet d'établir l'âge des planchers stalagmitiques ou des couches de sédiments marins *(ici le site préhistorique de la caune de l'Arago, à Tautavel, Pyrénées-Orientales, daté de -500 000 ans pour le plancher stalagmitique situé au sommet)*.

Jusqu'à 10 000 ans avant notre ère

MPIF/DÉPARTEMENT 77

LA DENDROCHRONOLOGIE

Et si les arbres pouvaient parler ? Leur croissance irrégulière, dépendante des conditions climatiques, se lit dans la largeur de leurs cernes annuels qui renseigne précisément sur l'année à laquelle des objets en bois comme des poutres ou des embarcations ont été façonnés. Ainsi, c'est par dendrochronologie qu'a pu être datée précisément la barque carolingienne *(ci-contre)* retrouvée en 1992 à Noyen-sur-Seine (Seine et Marne). Les analyses ont révélé qu'elle avait été taillée dans le tronc d'un chêne centenaire durant l'hiver 834-835 ! La méthode permet également de renseigner sur les climats du passé et ce jusqu'au mésolithique, 10 000 ans avant notre ère.

RMN-GRAND PALAIS

Jusqu'à 200 000 ans

LA THERMOLUMINESCENCE

Tout matériau chauffé pour être façonné par la main humaine peut être daté par la réaction des cristaux de quartz ou de feldspath qu'il contient. En effet, ces derniers possèdent la propriété d'émettre de la lumière lorsqu'ils sont soumis à une forte température. Lorsqu'il a été travaillé, l'objet a perdu sa charge énergétique qui s'est lentement reconstituée au fil du temps. En le chauffant de nouveau à plus de 500 °C, il devient possible d'analyser la quantité de lumière émise et ainsi d'estimer le temps séparant les deux cuissons. Outre les céramiques, *« cette méthode sert principalement à dater les silex chauffés »*, précise Christine Hatté *(ici un biface acheuléen mis au jour aux Eyzies-de-Tayac, Dordogne)*.

De 200 000 à 5 millions d'années

EPCC-CERP TAUTAVEL

LA RÉSONANCE PARAMAGNÉTIQUE ÉLECTRONIQUE

Fondée sur la capacité de certains électrons à absorber et réémettre l'énergie d'un rayonnement électromagnétique, cette méthode, utilisée à l'origine pour l'analyse des matériaux, ainsi que pour déterminer certains paramètres biologiques, a également trouvé son intérêt en archéologie. Elle s'emploie essentiellement pour dater les os et les dents qui sont riches en apatite, un minéral contenant des traces d'isotope d'uranium *(ici une dent datée de -550 000 ans trouvée à Tautavel, Pyrénées-Orientales)*. Elle sert aussi pour les sédiments, les concrétions dans les grottes, les coquillages, les grains de quartz ou des coraux. Sa période d'application s'étend de 200 000 à 5 millions d'années.

Jusqu'à 100 000 ans

INRAP, RMN-GRAND PALAIS

L'ARCHÉOMAGNÉTISME

Ce procédé se base sur le fait que, lorsque l'on chauffe de l'argile, le matériau garde l'empreinte de la direction du champ magnétique terrestre au moment de sa cuisson. Or, au fil des millénaires, la position du pôle nord magnétique a énormément varié jusqu'à s'inverser complètement. Ces variations ont été répertoriées, permettant d'établir une chronologie de référence. Toutefois, la technique ne peut être utilisée seule, plusieurs dates pouvant correspondre à une même orientation. Elle doit donc être complétée par d'autres outils. L'archéomagnétisme permet de dater par exemple les fours de potier, à condition qu'ils n'aient pas été déplacés depuis leurs dernières chauffes *(ici, un four gallo-romain, IIe- IIIe siècle, Paris)*.

Et aussi...

RMN-GRAND PALAIS

LA STRATIGRAPHIE, LA TYPOCHRONOLOGIE ET LA SÉRIATION

À l'inverse des précédentes, ces trois méthodes sont relatives : elles ne renseignent sur la date de fabrication d'un objet que par comparaison avec des vestiges analogues sur des sites déjà datés. Ou en tissant des liens chronologiques entre plusieurs « artefacts » en un même lieu. La stratigraphie étudie la succession des couches géologiques. La typochronologie, l'évolution de la forme ou du mode de fabrication de productions humaines : céramiques, armes, outils *(ici pointes à cran datées de -20 000 à -15 000 ans avant J.-C)*, bijoux... La sériation tente de proposer une hiérarchisation chronologique d'un ensemble d'objets. Par exemple, dans une nécropole, elle permet de comprendre dans quel ordre les sépultures ont été mises en place.

L'origine des mégalithes de Stonehenge enfin découverte

Une étude approfondie de la roche a permis de déterminer que ces pierres dressées proviennent d'un bois situé à 25 kilomètres du célèbre monument britannique.

Il s'agit d'une petite forêt située à environ 25 kilomètres du célèbre site de Stonehenge, à la lisière de Marlborough Downs (Royaume-Uni). Et les archéologues assurent que ce bois appelé West Woods recèle la clé d'un mystère : la provenance des mégalithes du monument néolithique classé au patrimoine mondial de l'Unesco. Des tests géochimiques indiquent en effet que 50 des 52 mégalithes partagent cette origine. Et tous auraient été érigés à peu près au même moment, vers 2500 avant J.-C.

Trancher entre plusieurs sites possibles

Stonehenge est composé de deux types de roches. D'abord les mégalithes, qui sont des blocs de grès dit sarsen. Puis des pierres de plus petite taille, disposées en cercle et en fer à cheval à l'intérieur de l'anneau mégalithique et connues sous le nom de *bluestones*, ou pierres bleues. Elles sont faites de dolérite (roche magmatique semblable au basalte) et de rhyolite (roche volcanique à grain fin). Ces dernières années, les archéologues avaient déjà pu identifier l'origine des pierres bleues : elles proviendraient des collines de Preseli, au sud-ouest du Pays de Galles, à plus de 200 kilomètres du site. Mais l'origine des mégalithes de grès demeurait mystérieuse, plusieurs sites possibles de provenance ayant été identifiés. Une étude approfondie de la roche a permis de trancher.

A.PATTENDEN/ENGLISH HERITAGE/ REUTERS

SAM FROST, ENGLISH HERITAGE.

L'analyse par David Nash d'un prélèvement de grès (ci-contre), fait dans un mégalithe de Stonehenge (en haut) il y a 60 ans, a permis de comparer sa signature chimique avec celle de roches provenant d'une vingtaine de sites au sud de l'île.

Pour ce faire, les chercheurs ont d'abord établi avec un spectromètre portable que la nature de la roche de 50 des mégalithes semblait identique. Mais c'est une découverte inattendue qui a permis à l'équipe du géophysicien David Nash, professeur à l'université de Brighton, et de l'archéologue Timothy Darvill d'affiner leurs résultats : en 2018, ils ont mis la main sur une « carotte », un prélèvement, de grès de Stonehenge, de 1,08 m. Celle-ci avait été extraite il y a 60 ans à l'occasion de travaux de conservation, quand des tiges métalliques avaient été insérées pour stabiliser un mégalithe fissuré. Elle avait ensuite été égarée… avant qu'un fragment n'en soit finalement retrouvé par un ancien employé de l'entreprise chargée de l'opération ! Les chercheurs disposaient ainsi d'un matériel leur permettant d'étudier les caractéristiques de la roche sans risquer d'endommager le monument. Ils ont pu alors comparer la signature chimique des mégalithes avec celle de sarsen extraits dans une vingtaine de sites au sud de l'île. Et établir que celui de West Woods correspond le mieux.

Pourquoi la population du néolithique à l'origine de Stonehenge a-t-elle choisi ce site plutôt qu'un autre ? Les chercheurs n'ont pas la réponse, évoquant seulement la qualité des roches et la bonne accessibilité des lieux. Ils ignorent aussi comment les bâtisseurs sont parvenus à transporter des blocs pouvant peser jusqu'à 30 tonnes sur une telle distance. Autre mystère : pourquoi deux pierres, situées les plus au nord sur leurs arcs de cercle respectifs, proviennent d'autres sites ? La fabuleuse construction est loin d'avoir livré tous ses secrets ! ■

Marine Benoit avec Mathieu Nowak
@MarineBenoit @MathieuNowak

La génétique au secours des lions

Étudier la généalogie et les relations entre les différents groupes ou sous-espèces de lions est indispensable pour éviter l'extinction du « roi des animaux », qu'une érosion génétique a rendu très fragile. Neuf félins sur dix ont disparu en deux siècles.

Par Rachel Mulot @RachelFleaux

Une étude génétique permettra-t-elle de rendre au roi de la jungle un peu de sa superbe ? C'est l'espoir formulé par des scientifiques (danois, norvégiens, américain, espagnols, russe, malaisiens, britannique et chinois) qui viennent d'éclaircir *« l'histoire évolutive des lions éteints et vivants »* dans un article paru dans la revue américaine *PNAS* (*Proceedings of National Academy of Science*). Tous aimeraient enrayer autant que possible le déclin du fauve, autrefois l'un des grands carnivores les plus répandus au monde et désormais classé comme vulnérable sur la liste rouge de l'Union internationale de conservation de la nature (UICN). Au cours des 200 dernières années, les lions modernes (*Panthera leo*) ont en effet perdu jusqu'à 90 % de leurs effectifs ! *« Bien que les efforts de conservation contribuent à l'accroissement de la population après des siècles de déclin, leur remarquable manque de diversité génomique les rend fragiles : ils pourraient être extrêmement sensibles à la*

Les fauves du parc national du Serengeti, en Tanzanie, forment l'une des plus grandes populations actuelles de ces félins, avec 2000 individus. Elle n'en est pas moins menacée par les problèmes dus à la consanguinité.

MICHAEL NICHOLS/NATIONAL GEOGRAPHIC IMAGE COLLECTION

"dépression de consanguinité" [perte de valeur sélective qui entraîne l'apparition de caractères délétères] et à l'érosion génétique, ainsi qu'aux épidémies de nouveaux pathogènes », avertissent les auteurs de l'article parmi lesquels le biologiste moléculaire américain Stephen O'Brien, réputé le meilleur spécialiste mondial de la génomique des félins. À quoi bon en effet réintroduire des fauves qui ne pourront pas faire souche ?

Certes, les efforts considérables des scientifiques impliqués dans la conservation, appuyés par les ONG, ont permis de mieux protéger les fauves, notamment en impliquant les communautés locales dans la gestion et la surveillance de ces animaux croqueurs de bétail et, à l'occasion, mangeurs d'hommes. Mais il leur manquait encore le coup de pouce de la génétique pour mieux comprendre comment se répartissent les sous-espèces... et permettre ainsi d'organiser des croisements viables. « *Ce travail n'est pas seulement excitant pour nous, généticiens et historiens de la nature. Il est également crucial pour qui souhaite conserver ces félins et leur donner une chance équitable de survivre en tant qu'espèce en dehors de la captivité* », souligne Tom Gilbert, directeur du Center for Evolutionary Hologenomics de l'université de Copenhague (Danemark).

40 %
des lions d'Afrique
ont disparu au cours des dernières décennies. Il ne subsiste plus que 29000 à 32000 individus.

600
lions d'Asie subsistent en Inde,
contre 180 dans les années 1960, mais tous sont fortement consanguins.

Aujourd'hui, en effet, les *Panthera leo* subsistent uniquement dans de petites populations isolées, principalement en Afrique australe et orientale *(voir carte p. 60)* « *La principale menace est la réduction de leur habitat. Plus nous aurons de populations viables, meilleures seront les chances* », insiste Stephen O'Brien, professeur au Halmos College of Natural Sciences and Oceanography de la Nova Southeastern University (NSU) en Floride (États-Unis) et fondateur du Centre de bio-informatique du génome Theodosius-Dobzhanski à l'université de Saint-Pétersbourg (Russie). Dans les années 1990, ses travaux sur les quelque 100 lions isolés du cratère Ngorongoro et leurs 2000 voisins du parc naturel de Serengeti (Tanzanie), ainsi que ses études sur quelques centaines de lions de Gir (Inde), pointaient déjà les risques de consanguinité, la piètre capacité à se reproduire des populations les plus coupées des autres, ainsi que leur fragilité face à certaines pathologies, comme la maladie de Carré, due à un virus proche de celui de la rougeole (paramyxovirus).

Peu de spermatozoïdes et de testostérone

Il avait aussi constaté une forte consanguinité chez les animaux de zoos américains et asiatiques de différentes sous-espèces, que certains espéraient réintroduire en milieu naturel pour restaurer les populations. « *Les lions de Gir avaient cinq fois moins de spermatozoïdes mobiles par éjaculat que ceux du Serengeti et une réduction de dix fois du niveau de testostérone*, rappelle-t-il. *Il valait mieux établir les degrés de parenté entre les différentes populations et sous-espèces pour espérer réussir.* »

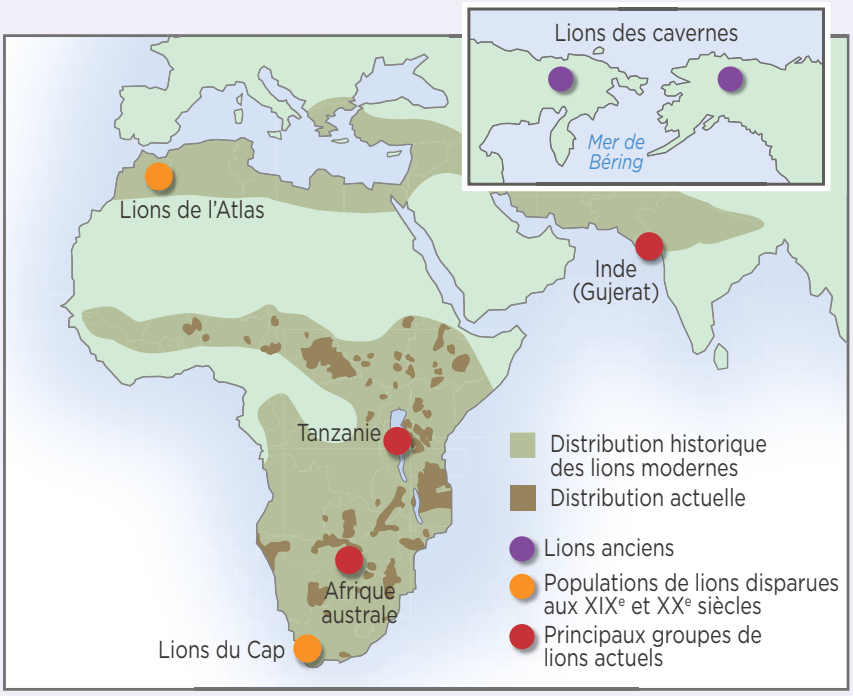
Mais, à l'époque, son approche n'avait pas convaincu les conservateurs..., les experts n'étaient pas d'accord sur le nombre de sous-espèces existant ou ayant existé, notamment en raison d'un probable recoupement important entre plusieurs d'entre elles.

Trente ans plus tard, Stephen O'Brien, entouré d'une équipe internationale, est donc revenu avec des arguments renforcés. « *Nous voulions en savoir davantage sur les relations entre les différents groupes ou populations et notamment quelle est la diversité génétique aujourd'hui par rapport au passé* », explique Michael D. Martin du

DISPARITIONS

Une cohabitation meurtrière avec l'humain

C'est l'étude génétique de deux lions des cavernes, 12 lions de populations éteintes en Afrique et au Moyen-Orient — tels les lions du Cap ou de l'Atlas — et de 6 lions modernes d'Afrique et d'Inde qui a permis de dessiner enfin l'histoire évolutive d'une espèce autrefois largement répandue. Selon ces résultats publiés dans les *PNAS*, les lions des cavernes (*Panthera leo spelaea*) et les lions modernes (*Panthera leo*) ont divergé d'un ancêtre commun il y a environ 500 000 ans, sans jamais plus s'hybrider. Il y a environ 70 000 ans, les lions modernes se sont clairement divisés en deux lignées distinctes : les lions trouvés en Afrique centrale, orientale et australe aujourd'hui et les lions indiens, ouest-africains et nord-africains (éteints). « *Les résultats illustrent le pouvoir de la génomique dans la révélation des secrets perdus de la préhistoire en lisant les codes d'empreinte ADN chez les ancêtres des espèces modernes* », estime Stephen O'Brien, de l'université de Floride (États-Unis). Dès l'Antiquité, les félins ont commencé à subir une pression anthropique, lors de l'extension des civilisations de la vallée de l'Indus et de Mésopotamie en Asie, ou des civilisations égyptienne, puis grecque et romaine, en Afrique du Nord. La réduction de la diversité génétique des populations de lions d'Afrique australe, notamment est, elle, associée à la colonisation européenne au cours du XIXe siècle. La chasse impitoyable à laquelle ont été soumis ces grands prédateurs a eu raison de nombreuses sous-espèces dont le lion du Cap, ainsi que, au nord, du lion de Barbarie. Selon certaines estimations, pas moins d'un million de lions vivaient à l'état sauvage dans le monde en 1950.



BRUNO BOURGEOIS

Autrefois répandus sur la plus grande partie du continent, les lions d'Afrique ne se trouvent plus qu'en Afrique subsaharienne. Trois des cinq plus grandes populations se situent en Tanzanie alors que les lions ont disparu de 12 pays d'Afrique subsaharienne au cours des dernières décennies. De minuscules groupes reliques persistent également en Afrique centrale et de l'Ouest. Au total, il n'y aurait plus qu'entre 29 000 et 32 000 individus adultes. En Asie, seuls 600 fauves perdurent dans la réserve forestière de Gir, dans l'État du Gujerat, en Inde.

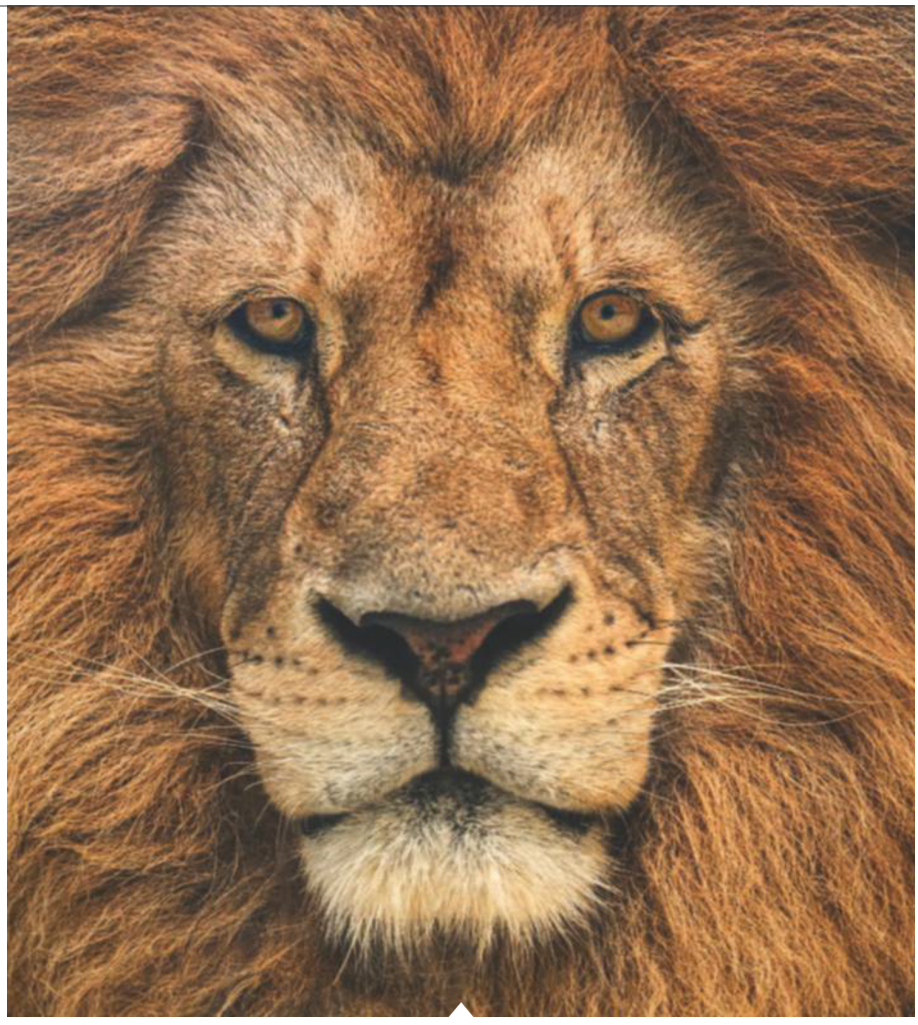
MUSÉE DU LOUVRE/RMN-GRAND PALAIS/MARC JEANNETEAU

Le lion du Cap, ici dessiné par Rembrandt, peuplait jadis toute l'Afrique australe. Traqué dès le XVIIe siècle par les colons hollandais, dont il menaçait le bétail, il a fini par disparaître en 1865.

Musée universitaire norvégien des sciences et de la technologie (NTNU), à Trondheim, l'un des coauteurs. Or les études précédentes avaient utilisé l'ADN mitochondrial, issu de la mère (ADNmt), pour étudier les relations entre les différentes populations. *« Mais l'ADNmt n'est qu'une petite partie du matériel génétique. Nous avons donc examiné tout l'ADN, y compris de lions des cavernes disparus voici 16 000 ans, pour obtenir une image plus complète.* » Les dernières analyses génomiques ont ainsi montré que les lions d'Afrique centrale étaient étroitement liés aux lions d'Afrique australe plutôt qu'à ceux du Nord. Ils pourraient constituer une ressource pour renforcer les troupes de l'Ouest.

Des connaissances pour guider les réintroductions

Les résultats dévoilent aussi une relation plus étroite mais incongrue géographiquement entre les lions d'Afrique du Nord justement et ceux d'Asie plutôt qu'avec les lions d'Afrique de l'Ouest. Elle pourrait provenir de *« couloirs de migration entre l'Afrique saharienne et le Proche-Orient qui ont peut-être existé dans le passé, par exemple à travers le bassin du Nil »*, explique l'article. Connaître le parent le plus proche du lion de Barbarie, ou de l'Atlas, aujourd'hui éteint — mais dont il subsisterait quelques descendants ou hybrides dans un zoo marocain — devrait guider désormais les éventuelles tentatives de réintroduction. La découverte des parents vivants les plus proches des lions indiens pourrait enfin éclairer les futures initiatives de « restauration » et de croisements. D'autant que la nouvelle étude confirme que l'appauvrissement génétique du lion indien s'est aggravé de façon alarmante, faute de réintroduction appropriée, mais aussi parce que certains groupes se sont coupés des autres, en raison de l'activité humaine. *« En ce qui concerne une éventuelle "restauration" de la population de lions, permettez-moi d'utiliser une métaphore,* conclut Nobuyuki Yamaguchi, spécialiste des félins à l'université Terengganu de Malaisie. *Si nous voulons restaurer un monument endommagé, Notre-Dame-de-Paris par exemple, nous ne voulons peut-être pas simplement construire un nouveau bâtiment. Dans ce contexte, il est très important de comprendre l'histoire évolutive du lion, qui est le "plan" original pour "restaurer" les populations de lions.* » Un travail important sera encore nécessaire selon les auteurs, pour *« trier les interrelations entre les différentes sous-espèces et groupes »* du roi déchu des animaux. ■



IMAGEBROKER / DIGFOTO / BIOSPHOTO

Les lions indiens, dont quelques centaines d'individus survivent dans la réserve de Gir, au Gujerat, sont les derniers représentants des sous-espèces septentrionales de « Panthera leo ».

ÉCONOMIE

En Afrique du Sud, un animal de ferme

Au-delà de réserves privées ou nationales, *Sciences et Avenir* a visité deux fermes à lions lors d'un voyage en Afrique du Sud, près de Kruger, en 2004, une pratique toujours autorisée quoique réglementée. Dans la première, les félins, élevés exclusivement pour la chasse, étaient croisés jusqu'à la débilité pour obtenir des lions à robe blanche, trophées onéreux et prisés. Les petits étaient arrachés à leur mère — pour éviter tout infanticide — immédiatement après la naissance et élevés dans des cages minuscules, où ils pouvaient à peine bouger, encore moins jouer, séparés de leurs frères ou sœurs. Une seconde ferme, où les félins vivaient dans de plus vastes enclos et où les lionnes étaient en petit clan, travaillait à produire des animaux en bonne santé, espérant qu'ils pourraient un jour être réintroduits dans le parc Kruger, dont les félins étaient atteints de tuberculose, transmise par les bovins dont ils se régalaient. Mais leur origine génétique ne faisait pas l'objet d'étude scientifique.

Un partage intelligent de l'énergie solaire

Sur l'île d'Yeu, en Vendée, cinq maisons équipées de panneaux solaires mettent en commun l'électricité produite pour en faire bénéficier 18 autres logements. Une expérience d'autoconsommation sans violation de la vie privée.

CONTRAIREMENT à beaucoup d'autres lotissements du même genre, celui de Ker Pissot innove. Le maire de l'Île-d'Yeu (Vendée), Bruno Noury, y a inauguré début juillet le premier quartier pavillonnaire en « autoconsommation ». Cinq maisons individuelles arborent désormais sur le toit 64 panneaux photovoltaïques pour 23,7 kilowatts-crête (kWc), la puissance optimale pouvant être délivrée par cette installation, ce qui couvre une grande partie des besoins domestiques, hors chauffage. Mais au lieu de revendre l'électricité au réseau de distribution basse tension d'Enedis — comme cela se fait déjà dans beaucoup de villes en France et d'ailleurs —, ces producteurs partagent les bénéfices des électrons avec leurs voisins, en l'occurrence 18 autres maisons. Une batterie de 15 kilowattheures (kWh) installée dans l'une d'entre elles stocke les surplus d'énergie solaire et six autres membres de cette « communauté énergétique » originale ont accepté que leur ballon d'eau chaude serve également à emmagasiner l'énergie en surplus pour la restituer sous forme d'eau chaude. Bruno Noury y voit l'avenir de son île, sinon son indépendance vis-à-vis du continent, au moins un pas essentiel dans la « transition énergétique Yeu 2030 », une démarche labellisée et encadrée dans le cadre de la centaine de « territoires à énergie positive » que compte la France.

ENGIE

Les 64 panneaux photovoltaïques, d'une puissance de 23,7 kWc, assurent les besoins en énergie hors chauffage de 23 familles.

Une trentaine d'expérimentations collectives du même genre sont en cours dans l'Hexagone.
C'est parce que l'île vendéenne est déjà bien engagée dans la sortie du pétrole qu'Engie, le premier groupe énergétique français, a décidé d'y implanter cette expérience qui sera menée pendant deux ans. « *Nous cherchions un quartier de maisons individuelles plutôt dense, mêlant habitat social et privé où les habitants accepteraient un partage des bénéfices de l'énergie produite par quelques-uns d'entre eux*, explique Jean Bertrand-Hardy, directeur stratégie du groupe Engie. *C'est ainsi qu'a débuté le programme Harmon'Yeu financé intégralement par l'entreprise.* » Créer une « communauté » dans l'habitat individuel n'allait pas de soi. « *L'accueil a été plutôt favorable même s'il a fallu rassurer, notamment sur les risques de violation de la vie privée* », reconnaît David Pirès, ingénieur chez Engie et homme de terrain du programme. Quelques mois ont ensuite été nécessaires pour monter la « personne morale organisatrice » (PMO), association qui encadre les relations entre les 23 familles. Et la Commission nationale de l'informatique et des libertés (Cnil) a avalisé l'expérience lorsqu'elle a obtenu l'assurance que les données ne pourraient pas être exportées de la « box » qui gère le système électrique de chaque maison.

400 000
Le nombre de maisons individuelles et immeubles équipés de panneaux photovoltaïques en France.

72 000
Le nombre de maisons individuelles en autoconsommation en France.

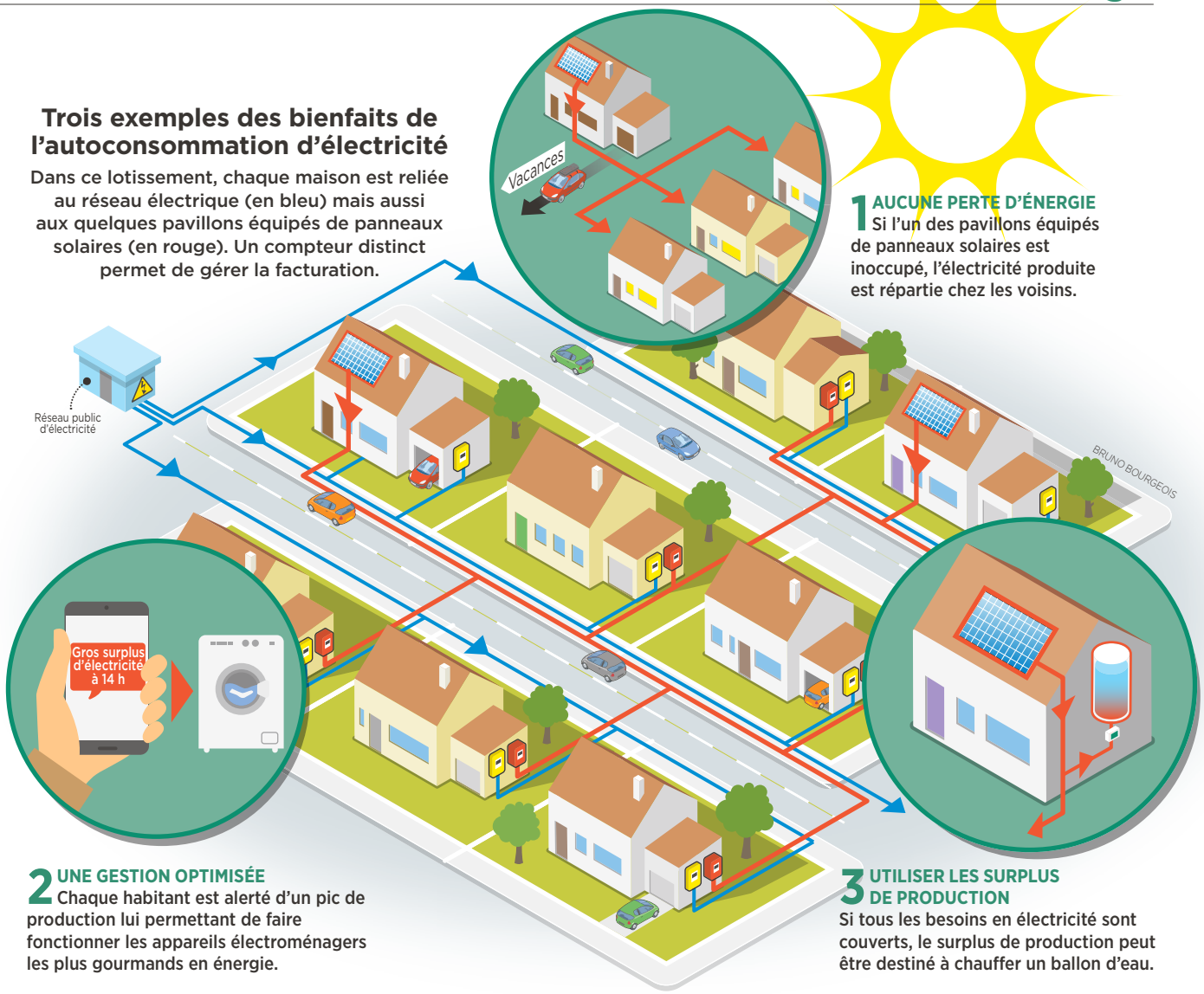
10 000 euros
L'investissement moyen pour installer l'énergie solaire en autoconsommation dans une maison individuelle.

Production et consommation calculées en temps réel

L'autoconsommation implique en effet une connaissance plus pointue, par chaque utilisateur, de sa consommation d'énergie. Depuis les débuts du développement du photovoltaïque en France dans les années 2000, 400 000 ménages se sont équipés de panneaux solaires avec à la clé la signature de contrats sur vingt ans stipulant la revente totale de l'électricité produite... sans possibilité légale d'en conserver une part pour son usage personnel. L'autoconsommation casse ce schéma. « *En consommant pour son compte l'énergie provenant de son toit, l'habitant n'est plus seulement un vendeur d'électricité mais un consommateur qui va chercher à optimiser l'utilisation de sa production pour réduire au maximum*

Trois exemples des bienfaits de l'autoconsommation d'électricité

Dans ce lotissement, chaque maison est reliée au réseau électrique (en bleu) mais aussi aux quelques pavillons équipés de panneaux solaires (en rouge). Un compteur distinct permet de gérer la facturation.



1 AUCUNE PERTE D'ÉNERGIE
Si l'un des pavillons équipés de panneaux solaires est inoccupé, l'électricité produite est répartie chez les voisins.

2 UNE GESTION OPTIMISÉE
Chaque habitant est alerté d'un pic de production lui permettant de faire fonctionner les appareils électroménagers les plus gourmands en énergie.

3 UTILISER LES SURPLUS DE PRODUCTION
Si tous les besoins en électricité sont couverts, le surplus de production peut être destiné à chauffer un ballon d'eau.

l'énergie provenant du réseau et donc sa facture », souligne Hervé Lextrait, chef du pôle « transition énergétique » chez Enedis, qui gère le réseau. De quoi oublier les « heures creuses » des tarifs EDF incitant à faire fonctionner son électroménager la nuit. C'est en pleine journée et en plein soleil, qu'il convient désormais à ces habitants de l'île d'Yeu de faire tourner leur machine à laver ! « *À côté de leur compteur Linky, un autre compteur Enedis va calculer toutes les 5 minutes les flux d'énergie entre les panneaux et les 23 maisons du programme. Cela permettra d'établir pour chacun les factures de l'électricité de complément achetée sur le réseau mais aussi étudier une répartition dynamique de l'énergie dans lesquels les comportements humains sont essentiels* », poursuit Jean Bertrand-Hardy. Les habitants sont ainsi aidés par une application sur leur smartphone qui indique en temps réel la production solaire, leur consommation et les plages horaires favorables à la mise en marche des appareils. Harmon'Yeu va donc servir à étudier cette gestion de millions de données mêlant la météo, les prévisions de production et le comportement des consommateurs. « *Entre mars et juin 2020, nous avons déjà constaté que 96 % de l'énergie produite avait été consommée localement et que 28 % des besoins des ménages avaient été couverts par les panneaux du quartier* », se réjouit David Pirès.

L'expérience de Ker Pissot suit le développement de l'autoconsommation individuelle. « *72 000 personnes ont choisi ce mode de production en France depuis que la réglementation le permet en 2017 et désormais les installateurs ne proposent plus que cette solution en raison de la forte baisse des aides à la vente de l'énergie photovoltaïque* », assure Hervé Lextrait. Pour Enedis, l'enjeu est financier, l'entreprise devant trouver son équilibre dans ce nouveau dis-

TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Rendre durables bureaux et centres commerciaux

Un autre marché apparaît prometteur pour l'autoconsommation : les immeubles de bureaux et les centres commerciaux. « *Au contraire des particuliers qui vont travailler dans la journée, les supermarchés sont ouverts au moment où il fait soleil*, explique Samy Engelstein, en charge du dossier au Syndicat des énergies renouvelables (SER). *Ils ont de plus des groupes de froid qui ont besoin d'énergie aux heures les plus ensoleillées.* » Même constat à l'Observatoire de l'immobilier durable (OID), un organisme indépendant qui réfléchit à la gestion écologique des bâtiments tertiaires. L'OID note aussi que les heures d'ouverture des bureaux coïncident avec la production photovoltaïque. Il s'agit dès lors d'imaginer de nouvelles relations contractuelles entre le propriétaire du bâtiment et les entreprises l'occupant pour un partage des bénéfices. Les réflexions sont pour l'instant largement virtuelles.

PASCAL GUYOT/AFP

Installée sur le parking d'un centre commercial à Saint-Aunès (Hérault), cette centrale solaire produit 1,42 GWh d'électricité par an, soit la consommation annuelle de plus de 400 familles.

La réglementation impose en effet que les projets passent par des appels d'offres de la Commission de régulation de l'énergie (CRE). Une procédure lourde qui peut décourager les bonnes volontés.

positif. En effet, si elle se généralise, l'autoconsommation réduira les flux d'électrons qui sont facturés au consommateur au prix fixé par le Tarif d'utilisation du réseau public d'électricité (Turpe) afin de rémunérer Enedis et le Réseau de transport d'électricité (RTE) pour la haute tension. Mais Enedis peut aussi y trouver des avantages car l'autoconsommation permet d'éviter les surcharges sur son réseau. L'entreprise poursuit depuis 2018 une expérience sur les Souffleurs, une résidence de Bordeaux gérée par l'organisme social Gironde Habitat. L'autoconsommation s'y déroule entre locataires, à la différence près qu'Enedis n'a — contrairement au lotissement de l'île d'Yeu — qu'un seul client à facturer. EDF de son côté teste depuis deux ans son propre pilotage sur trois immeubles appartenant au bailleur le Logis cévenol à Alès (Gard). « *Nous n'avons eu aucune défection parmi les 300 locataires de cet ensemble mais nous devons toujours accompagner les foyers, d'abord pour éviter qu'ils ne se mettent à surconsommer du fait du faible coût de l'énergie. Puis pour leur rappeler qu'ils sont acteurs d'une expérience, ce qui s'oublie vite* », raconte Frédéric Marcos, de la direction commerciale d'EDF.

Une pratique qui doit rester citoyenne pour EDF

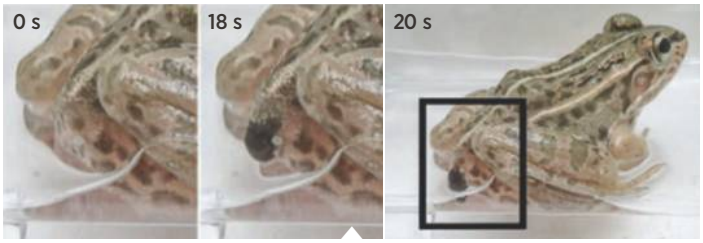
Les professionnels de l'énergie estiment ainsi que l'autoconsommation a de beaux jours devant elle… bien qu'elle soit brimée. La réglementation impose en effet que les « partageurs » se trouvent dans un rayon d'un kilomètre les uns des autres et la puissance est bridée. Mais l'évolution de la réglementation comme les objectifs officiels de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) pour diminuer la consommation d'énergie d'ici à 2028 devrait faire sauter ces verrous. « *On peut d'ores et déjà imaginer que des quartiers entiers mêlant habitat, bureaux et usines soient en autoconsommation avec de grandes capacités de stockage pour prolonger la couverture des besoins après le coucher du soleil*, s'enflamme Jean Bertrand-Hardy. *C'est ainsi un moyen efficace de joindre la production décentralisée d'électricité aux politiques d'économie d'énergie.* » En bon représentant d'EDF, producteur historique d'électricité, Frédéric Marcos tempère : « *Il y a une limite, il faut que cela reste citoyen. Il ne peut se créer partout des milliers de petits distributeurs commerciaux.* » Le maire de l'Île-d'Yeu, lui, ne voit pas si loin. Mais il imagine déjà que les 25 km² et les 5000 habitants de sa commune soient tous en autoconsommation d'ici à la fin de la décennie. ■ **Loïc Chauveau**

@Loic_Chauveau

ENGIE

« C'est un moyen efficace de joindre la production décentralisée d'électricité aux politiques d'économie d'énergie »

Jean Bertrand-Hardy, directeur stratégique du groupe Engie



KOBE UNIVERSITY

L'insecte est excrété au bout de 4 heures en moyenne après avoir visité l'œsophage, l'estomac et les intestins de l'amphibien.

Le salut du coléoptère passe par l'anus

« Regimbartia attenuata » parvient à survivre à la grenouille qui vient de l'avaler en la forçant à déféquer…

Être avalé tout cru par une grenouille est une condamnation à mort pour la majorité des insectes, mais une espèce de coléoptère, *Regimbartia attenuata*, parvient à ne pas être digérée et à ressortir indemne du tube digestif. Sa technique : remuer ses pattes pour stimuler un réflexe de défécation ! C'est ce que montrent les expériences de Shinji Sugiura, de l'université de Kobe, au Japon, chercheur spécialiste des défenses des insectes des zones humides contre leurs prédateurs.

93 % des coléoptères survivent à l'ingestion

Il a nourri des grenouilles d'étang *Pelophylax nigromaculatus* avec différents insectes, dont le petit coléoptère aquatique en question. Seuls les *Regimbartia attenuata* en ont réchappé. 93 % de ceux qui ont été gobés par des grenouilles au cours de l'étude ont été excrétés par l'anus de l'amphibien, tête la première, au bout de quatre heures en moyenne, « *souvent empêtrés dans des boulettes fécales* » raconte le chercheur. L'évasion la plus rapide a duré six minutes seulement ! Le chemin périlleux de la bouche d'une grenouille à son anus passe par l'œsophage, l'estomac, l'intestin grêle et le gros intestin, soit un long tunnel sombre humide et sans air.

Si les muscles maintiennent le sphincter anal étroitement fermé, ceux-ci se relâchent lorsque l'amphibien défèque et les mouvements de pattes du coléoptère stimulent ce réflexe. Pour preuve, le chercheur a montré que si l'on immobilise les pattes des coléoptères avec une cire avant qu'ils ne se fassent gober par les grenouilles, ils ne s'en sortent cette fois pas vivants. « Regimbartia attenuata *a évolué pour devenir un meilleur nageur en donnant de véritables coups de pattes, et peut survivre sous l'eau en piégeant une petite poche d'air sous ses ailes*, rappelle Shinji Sugiura. *De la même façon, il a peut-être aussi développé une façon de survivre et de traverser l'intestin des grenouilles.* » En 2018, le chercheur japonais avait déjà découvert que, lorsqu'ils sont avalés par un crapaud, les scarabées bombardiers *Pheropsophus jessoensis* libèrent des produits chimiques si toxiques que l'amphibien renverse son propre estomac pour vomir le coléoptère, qui en sort gluant mais vivant. ■

Rachel Mulot @RachelFleaux

PAR CHRISTOPHE CASSOU *
CHRONIQUE COÉCRITE AVEC CÉLINE GUIVARCH **

L'Arctique : notre canari dans la mine

Températures supérieures à 38 °C au-delà du cercle polaire, feux gigantesques en Sibérie, débâcle précoce de la banquise d'amplitude inédite, l'état climatique de l'Arctique en 2020 contraste avec les étendues de steppes enneigées que nous avons tous dans notre imaginaire. Cet été choque : il inquiète et interpelle. En véritable sentinelle, l'Arctique nous informe sur l'état de santé climatique de notre planète. Le réchauffement observé depuis le début de l'ère industrielle y est deux à trois fois plus rapide qu'à l'échelle globale. Cette spécificité est due à des processus physiques amplificateurs liés à la disparition progressive de la neige, de la banquise et à la fonte du sol normalement gelé toute l'année, le pergélisol. L'Arctique est un territoire d'une sensibilité extrême et s'il s'emballe, c'est tout l'équilibre climatique planétaire qui va souffrir. La survie de certaines espèces endémiques est menacée. Les communautés des Inuits et des peuples sibériens font déjà face à des bouleversements profonds, voyant leurs pratiques de pêche et de chasse perturbées, leurs habitats et leurs moyens de transport fragilisés. Si pour certains transporteurs maritimes et groupes énergétiques, l'océan libre de glace est une opportunité pour l'ouverture de nouvelles routes commerciales et l'exploitation de ressources minières et pétrolières, les risques environnementaux et sociétaux d'une telle exploitation sont considérables. Tel un canari dans la mine de charbon qui, grâce à sa sensibilité extrême aux gaz toxiques, indiquait aux mineurs que les conditions n'étaient plus sûres, l'Arctique alerte l'humanité sur l'urgence de rompre avec la trajectoire actuelle du réchauffement. Écoutons ce cri de détresse et passons à l'action pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre. Ne pas agir à la hauteur des enjeux est irresponsable. ■

> « L'Arctique est la véritable sentinelle de l'état de santé climatique de notre planète »

* Directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.
** Directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

UNIVERSOIENCE

Une avancée majeure dans le traitement de la migraine

Une nouvelle classe de médicaments, administrable en auto-injection, réduit le nombre des crises invalidantes chez les patients les plus atteints. Autorisés aux États-Unis et en Europe, leur mise sur le marché est à l'étude en France.

Par Sylvie Riou-Milliot avec Cécile Coumeau

DU JAMAIS VU dans le traitement de la migraine : il est désormais possible de diviser par deux la fréquence des crises et d'obtenir parfois leur quasi-disparition chez environ un patient sur deux souffrant de formes sévères. Comment ? grâce à une nouvelle famille thérapeutique, des anticorps à s'injecter sous la peau, une fois par mois ou par trimestre. Cette innovation majeure, fruit de trente ans de recherche, est saluée par l'ensemble des neurologues, comme elle l'a été lors du 19e congrès de l'International Headache Society (Société internationale des céphalées, IHS) qui s'est tenu à Dublin (Irlande) à l'automne dernier. Elle l'est surtout par les milliers de patients qui ont participé à des essais cliniques menés en Europe et aux États-Unis. Alors qu'ils s'étaient montrés résistants à tous les autres traitements, 40 % d'entre eux ont vu leurs crises s'estomper et pour 30 % — dits super-répondeurs — elles ont presque disparu. Un tiers n'en a cependant retiré aucun bénéfice, sans que les médecins puissent encore établir des profils types. Ces médicaments très spécifiques, les anticorps monoclonaux anti-CGRP, s'attaquent à une des protéines (le peptide relié au gène calcitonine, CGRP selon son sigle anglais) sécrétées par le cerveau au moment des crises *(voir l'infographie ci-contre)*. Quatre laboratoires ont développé leur propre molécule : erenumab (Novartis), fremazumab (Teva), galcanezumab (Lilly) et eptinezumab (AlderbioPharmaceuticals). Seule ombre au tableau : si la plupart de ces molécules ont reçu une autorisation de mise sur le marché aux États-Unis et en Europe, elles ne sont toujours pas disponibles en France où les modalités de prescription sont à l'étude. Tout comme la question de leur remboursement, le coût du traitement s'élevant à environ 500 euros l'injection.

TABLEAU CLINIQUE

Migraine et céphalée

	MIGRAINE	CÉPHALÉE DE TENSION
Durée	4 h à 72 h	30 minutes/7 jours
Signes d'accompagnement	Intolérance au bruit ou à la lumière	Plus rare : intolérance au bruit
Intensité	Modérée à sévère	Légère à modérée
Type	Souvent pulsatile	Compression, étau
Effet de l'effort physique	Aggravation	Pas d'aggravation

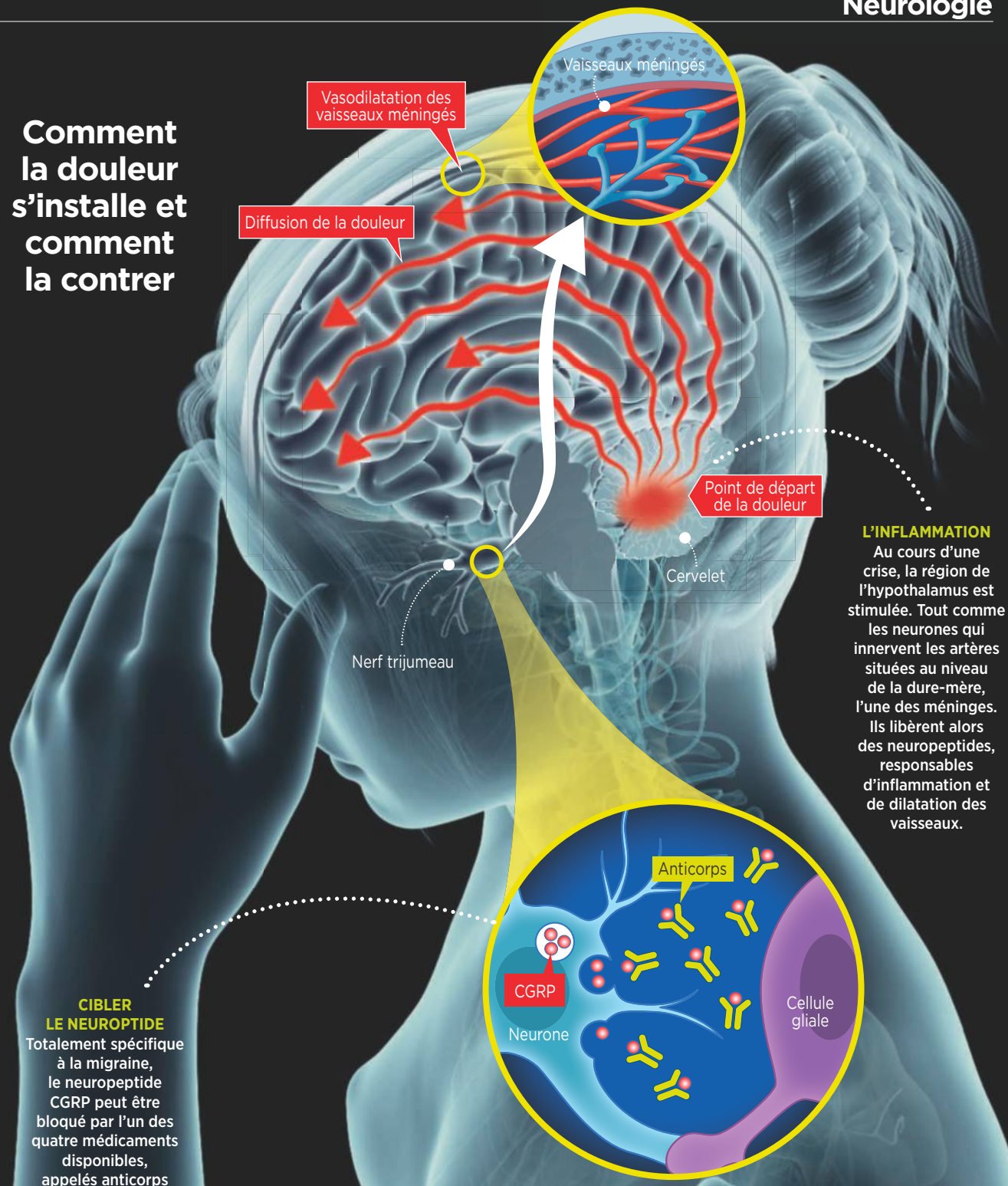
Vraie migraine ou céphalée de tension ? Quel diagnostic poser face à un mal de tête plus ou moins lancinant ? Si à la lecture de ce tableau les différences semblent bien marquées entre les deux affections, la distinction n'est pas si simple à établir en pratique. Surtout si les maux de têtes initialement épisodiques deviennent de plus en plus fréquents voire quotidiens, telle une maladie chronique.

200 types d'affections différentes

Voilà en tout cas bien longtemps qu'une telle avancée n'avait pas été annoncée dans le traitement des migraines, affections très particulières dans le tableau des maux de tête qui compte plus de 200 types, même si migraine et céphalées de tension regroupent l'essentiel des cas *(voir le tableau ci-contre et p. 68)*. « *L'étiquette "migraine" est encore trop fréquemment posée par facilité et méconnaissance* », souligne la Pr Anne Ducros, neurologue au centre hospitalier universitaire (CHU) de Montpellier. « *Sans oublier qu'une personne peut être atteinte à la fois de céphalées de* ▶

S. KAULITZKI/SPL - BRUNO BOURGEOIS

Comment la douleur s'installe et comment la contrer



L'INFLAMMATION
Au cours d'une crise, la région de l'hypothalamus est stimulée. Tout comme les neurones qui innervent les artères situées au niveau de la dure-mère, l'une des méninges. Ils libèrent alors des neuropeptides, responsables d'inflammation et de dilatation des vaisseaux.

CIBLER LE NEUROPTIDE
Totalement spécifique à la migraine, le neuropeptide CGRP peut être bloqué par l'un des quatre médicaments disponibles, appelés anticorps monoclonaux anti-CGRP. Tous s'administrent une fois par mois, par injection sous-cutanée.

ÉTIOLOGIE

Ces autres céphalées aux origines mystérieuses

Le « mal de tête » ne se résume pas à la migraine. Dans la grande famille des céphalées, l'une des plus handicapantes est sans conteste l'algie vasculaire de la face (AVF) qui engendre, entre autres symptômes, une douleur insupportable autour de l'œil. Restée une énigme pendant longtemps, cette maladie qui touche 70 000 Français a été décryptée par des chercheurs danois et allemands qui ont établi qu'elle était liée au peptide apparenté au gène de la calcitonine (*Jama*, 2018). Ce qui a ouvert la porte à un traitement par les anticorps monoclonaux anti-CGRP comme l'a montré une équipe du King's College à Londres (Royaume-Uni) en 2019. Ce médicament — en attente d'une autorisation de mise sur le marché en France — pourrait donc bien révolutionner aussi le traitement de l'AVF, comme celui de la migraine. La céphalée de tension est, quant à elle, la plus fréquente. Quelque 20 à 40 % des adultes dans le monde en souffriraient de façon épisodique. Et 5 % endureraient de manière chronique ces douleurs qui ont la caractéristique d'être non pulsatiles au niveau du front ou de la nuque, contrairement à celles de la migraine. Elles peuvent se révéler très invalidantes et sont pourtant *« l'un des parents pauvres de la recherche »*, regrette Benjamin Lisan, fondateur de l'association Papillons en cage. Car rien n'est visible à l'imagerie médicale, et la maladie a donc tendance à être sous-estimée. Son origine même reste controversée. Des états de stress et d'anxiété sont souvent évoqués. Une étude présentée à l'American Academy of Neurology (2014) a ainsi évalué que chaque hausse de 10 points sur l'échelle du stress se traduisait par une augmentation de 6,3 % des épisodes douloureux. Mais, comme l'écrit le Pr Michel Lantéri-Minet*, neurologue au CHU de Nice, ces facteurs psychologiques pourraient *« moduler l'expressivité clinique de la céphalée de tension »* sans pour autant en être la cause. Autre hypothèse : des contractions musculaires au niveau de la tête et du cou. En 2006, des chercheurs danois ont réalisé des enregistrements par électromyographie de l'activité musculaire chez des personnes souffrantes mais n'ont rien observé de spécifique. Cependant, cette étude n'a jamais été reproduite. Enfin, dernière piste, il pourrait s'agir d'un dérèglement du filtrage des signaux douloureux situé au niveau du système nerveux central. La céphalée de tension appartiendrait donc, comme d'autres pathologies chroniques

tension et de migraines », poursuit le Dr Michel Lanteri-Minet, neurologue au CHU de Nice. On estime en tout cas que 20 % environ de la population adulte dans le monde est concernée par cette affection neurologique définie par les critères très précis de l'IHS. Soit 10 millions de personnes en France, dont trois quarts de femmes. Si certains mécanismes de la maladie sont désormais percés à jour *(voir l'infographie p. 67)*, *« on ne connaît toujours pas le déclencheur des crises »*, note le neurologue niçois, même si des travaux récents laissent entrevoir le rôle d'une des enveloppes du cerveau, la pie-mère.

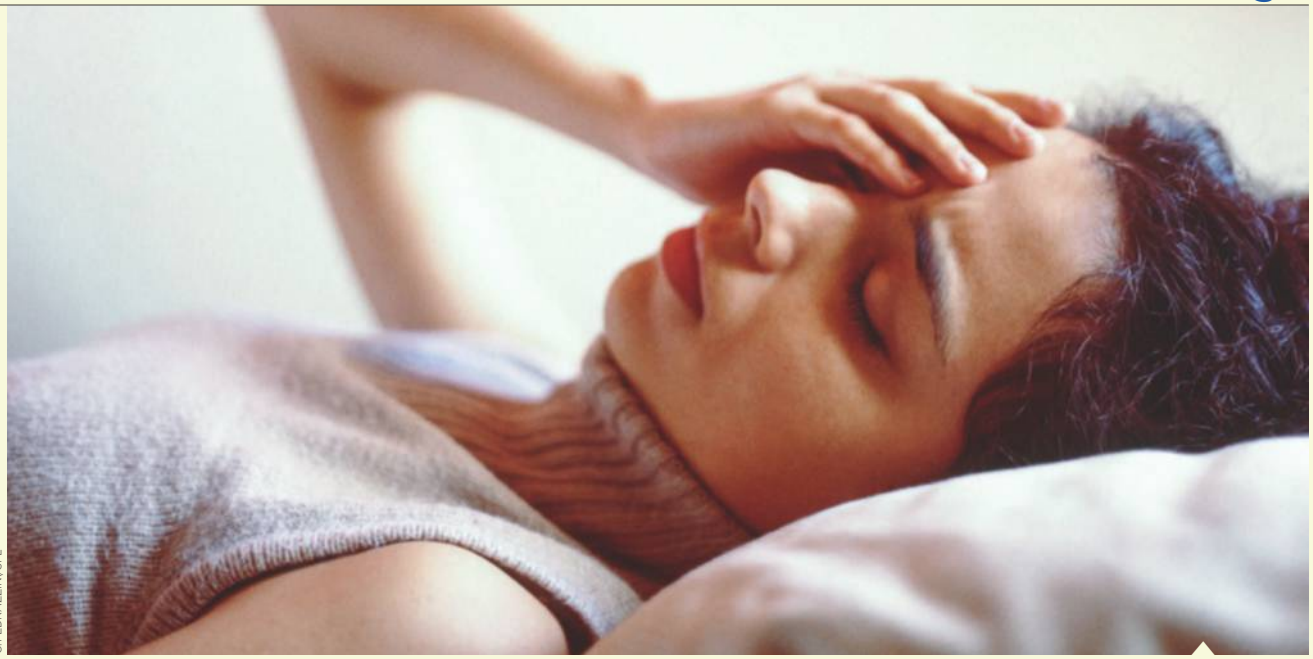
Pour tenter de soulager les crises douloureuses, parfois intolérables et qui peuvent durer jusqu'à 72 heures, les médecins disposaient jusqu'à présent d'une panoplie assez hétéroclite comprenant des médicaments pour le traitement de la crise et d'autres pour un traitement de fond. Les premiers (aspirine, anti-inflammatoires non stéroïdiens, paracétamol, triptans) sont parfois associés — selon la gravité des crises — aux seconds qui ne sont pas spécifiques de la maladie (antihypertenseurs, antidépresseurs, antiépileptiques…). Résultat : *« On prescrit des antihypertenseurs à des personnes non hypertendues, des antiépileptiques à des personnes non épileptiques, des antidépresseurs à des non-déprimés »*, explique Anne Ducros. *D'où l'intérêt des nouveaux anti-CGRP. »* *« Nous allons enfin disposer d'un traitement de fond spécifique pour les migraineux sévères en échec thérapeutique et pouvoir entrer dans une nouvelle dimension, celle de la prévention des crises »*, se réjouit la spécialiste.

Mais comment expliquer l'efficacité de cette famille thérapeutique

PHARMACOLOGIE

Les ditans, de nouvelles molécules pour traiter les crises

Les ditans forment une toute nouvelle classe thérapeutique en développement. À l'inverse des anticorps monoclonaux anti-CGRP, ils n'agissent pas en prévention mais traitent les crises comme le font actuellement les triptans. Le premier médicament de cette famille, le lasmiditan (Reyvow, laboratoires Lilly) fait intervenir des récepteurs à la sérotonine localisés sur les nerfs responsables de la transmission de la douleur. Fin janvier, la molécule a obtenu le feu vert outre-Atlantique. Elle n'est pas attendue en France avant plusieurs années.



C. PEDRAZZINI/SPL

L'apparition des céphalées de tension pourrait être liée au stress ou s'associer à des problèmes musculo-squelettiques cervicaux.

dont la fibromyalgie, aux « syndromes de sensibilité centrale ». Mais cette hypothèse n'est pas validée. Du côté des traitements, pas de consensus non plus mais différentes stratégies mises en œuvre selon les pistes envisagées. Antalgiques et anti-inflammatoires sont la principale prescription. En cas de résistance, des antidépresseurs ou des antiépileptiques peuvent être prescrits. Pour favoriser la décontraction musculaire, des injections de botox ont été testées. Résultat : la toxine botulique serait associée à une amélioration de la fréquence des migraines mais pas à celle des céphalées de tension (*Jama*, 2012). Des médecines complémentaires font aussi l'objet de recherche. Et *« les résultats disponibles suggèrent que l'acupuncture pourrait être efficace pour traiter les maux de tête fréquents de type tension épisodique ou chronique, mais d'autres essais sont nécessaires »*, a conclu la revue *Cochrane* en 2016 lors d'une méta-étude portant sur 12 travaux incluant plus de 2000 patients. ■ **C. C.**

• *Céphalées de tension*, Michel Lantéri-Minet, coll. Rumeurs & Réalités, Édition Medi-Text

prometteuse, qui prend pour cible un petit peptide de 37 acides aminés (CGRP) ? C'est tout d'abord le fruit d'une recherche entamée il y a plus de trente ans, à laquelle ont participé des scientifiques du monde entier de manière tout à fait originale.

Un puissant agent vasodilatateur

Tout commence en Californie dans les années 1980 avec l'étude d'une hormone, la calcitonine, produite lors de cancers de la thyroïde. Une publication de deux chercheurs américains, Michael Rosenberg et Susan Amara, parue dans la revue *Nature*, démontre que le gène codant pour cette hormone intervient aussi dans la fabrication du CGRP. Interloqué par ce résultat, le Suédois Lars Edvinsson, de l'université de Lundt, poursuit les investigations et établit que le CGRP est un très puissant agent vasodilatateur impliqué dans la migraine. Les recherches se poursuivent à l'université de Melbourne (Australie) dans les années 1990, où un neurologue de renommée mondiale, le Pr Peter Goadsby, collabore avec Lars Edvinsson. Tous deux démontrent que le taux sanguin du CGRP au niveau des veines jugulaires du cou s'élève au moment des crises. Enfin, c'est au Danemark que la très reconnue équipe danoise de Jes Olesen, de l'université de Copenhague, démontre en 2002 que l'injection intraveineuse de CGRP provoque une crise chez des patients migraineux, mais reste sans effet chez les non-migraineux. Une donnée qui renforce l'idée que les personnes sujettes à des migraines seraient hypersensibles à ce peptide et que ce dernier jouerait un rôle dans la

ANNE DUCROS

« Nous allons enfin disposer d'un traitement de fond pour les migraineux sévères en échec thérapeutique »

Pr Anne Ducros, neurologue, responsable du Centre d'urgences céphalée au centre hospitalier universitaire de Montpellier

THÉRAPEUTIQUE

Crise migraineuse : les alternatives aux médicaments

Plusieurs dispositifs médicaux peuvent permettre de réduire les douleurs liées à la migraine. Trois d'entre eux reposent sur la neurostimulation, le quatrième sur la lumière.

BSIP

CASQUE

Stimuler le nerf trijumeau

Le principe du dispositif externe Cefaly mis au point par une start-up belge — contrôlée par un fonds d'investissement américain depuis juin 2019 — est de stimuler le nerf trijumeau, principal responsable de la douleur (*voir l'infographie p. 67*). L'électrode adhésive, placée au niveau du front, est connectée magnétiquement à un casque produisant des micro-impulsions. À raison d'une séance de 20 minutes par jour, différents résultats attestent une diminution des douleurs et des crises d'environ 30 %, sans effets secondaires rapportés. (Rechargeable, 300 euros.)

ELECTROCORE LLC

BOÎTIER

Stimuler le nerf vague

Le boîtier Gammacore stimule les fibres du nerf vague, le plus long nerf du corps humain, au niveau du cou. Une excitation qui réduit les douleurs liées aux migraines. Développé par l'entreprise américaine Electrocore LLC, ce neurostimulateur non invasif a obtenu le feu vert des autorités de santé des États-Unis pour les douleurs chez l'adulte. (Non rechargeable, 500 euros.)

THERANOVA

PATCH

Neurostimulation cutanée

Le dispositif Nerivio Migra, de la société israélienne Theranova, associe patch et smartphone. Son principe repose sur la neurostimulation électrique transcutanée (TENS) pratiquée dans les centres antidouleur. Le courant de faible tension favoriserait la production d'analgésiques endogènes ou bloquerait le message de la douleur. En pratique, le patient colle le patch sur son bras pendant 30 à 45 min dès le début de la crise. Des tests en double aveugle ont montré que près de 70 % des patients du groupe traité étaient soulagés en deux heures contre 39 % dans le groupe témoin. Les autorités américaines ont autorisé la commercialisation en juin. Non disponible en France. (Coût aux États-Unis : 100 dollars.)

GETTY IMAGES

LUNETTES

La vie en vert

Si la lumière exacerbe les douleurs en cas de migraine, la fréquence correspondant à la couleur verte pourrait la soigner, selon une équipe de renommée internationale de la faculté de médecine Harvard (États-Unis) dans une étude parue en 2016 dans la revue *Brain*. Les patients ont rapporté une diminution d'environ 20 % de l'intensité de leurs crises avec cette longueur d'onde (500-577 nm). Des recherches sont en cours pour mettre au point des lunettes laissant passer uniquement le vert.

maladie. Le coup d'envoi est ainsi donné aux recherches menées dans plusieurs laboratoires internationaux pour mettre au point des molécules bloquant l'action du CGRP, ou de son récepteur, afin d'éviter les crises.

Toutes les interrogations ne sont cependant pas levées quant à l'utilisation de cette nouvelle famille thérapeutique. Notamment en raison du caractère ubiquitaire du CGRP. « *Ce neuromédiateur est présent chez tous les individus et distribué dans l'ensemble du système nerveux et des organes*, détaille Michel Lanteri-Minet. *Il est sécrété dans les situations de danger et a deux effets principaux : la stimulation de certains récepteurs impliqués dans la douleur mais aussi la vasodilatation des vaisseaux cérébraux, ce qui favorise une réaction inflammatoire de défense.* » D'où les interrogations des spécialistes sur les effets secondaires potentiels du traitement, en l'absence de données sur le long terme. « *Que se passe-t-il en cas d'infarctus du myocarde ou d'accident vasculaire cérébral chez un patient traité par un médicament qui bloque la production de CGRP ? Ces événements cardio-vasculaires seront-ils plus graves ? D'autant que le CGRP agit au niveau des artères dites distales — plus fines — qui sont davantage touchées chez les femmes que les artères dites proximales, de gros diamètre, plus souvent lésées chez les hommes.* » Le neurologue se veut cependant rassurant : « *À ce jour, près d'un demi-million de patients dans le monde ont reçu ces traitements et nous n'avons aucun signal d'alerte.* » D'autres questions demeurent sans réponse : quelles sont les différences d'efficacité et de tolérance entre les quatre anticorps (erenumab, fremazumab, galcanezumab et eptinezumab), aucune étude comparative n'ayant été menée par les industriels ? Quelle sera la durée idéale du traitement ? Et leur place exacte dans l'arsenal thérapeutique ? Pour l'heure, la France doit poursuivre dans les mois à venir différentes discussions réglementaires et tarifaires... ce qui risque de prendre du temps. Rappelons que les discussions autour des triptans ont duré sept ans...

« Service médical rendu insuffisant »

En attendant, les malades s'impatientent. Seul l'erenumab a été évalué par la commission de la transparence de la Haute Autorité de santé... et sa demande de remboursement rejetée pour « *service médical rendu insuffisant* ». Ce qui exaspère Anne Ducros : « *La migraine souffre toujours d'un cruel manque de reconnaissance. Trop d'hommes siègent encore dans ces commissions ! Ils n'y connaissent rien et pensent que la migraine c'est "une aspirine et hop au lit !"* » Cette vision est archaïque. Et la neurologue de poursuivre : « *Nous sommes en train de travailler avec la Société française d'études de la migraine et des céphalées pour mieux faire reconnaître la population de migraineux sévères concernée, c'est-à-dire ceux qui souffrent d'au moins huit jours de crise par mois non calmée par les traitements de fond, car elle n'a pas de réelle définition dans la classification actuelle.* » Nul doute, traiter la migraine est un véritable casse-tête, même pour les neurologues. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

Web

- L'article du site de l'Assurance-maladie sur la migraine : **sciav.fr/878Amelimigraine**
- Société française d'études des migraines et céphalées : **sfemc.fr**
- Fédération française de neurologie : **sciav.fr/878neurologie**

Ouvrage

- **La Migraine, biographie d'une maladie,** Esther Lardreau, Éditions les Belles Lettres.

PRATIQUE

4 conseils pour une meilleure prise en charge

1 OÙ SE FAIRE DIAGNOSTIQUER ?
Maux de tête et migraines étant parfois confondus, il est essentiel que le diagnostic soit porté par un neurologue pour éviter le recours anarchique à des médicaments non adaptés qui peuvent entraîner... des céphalées quotidiennes dues à des abus médicamenteux. Les consultations en services de neurologie ou en centres antidouleur sont les mieux adaptées : ils sont implantés dans les centres hospitaliers universitaires (CHU), répartis sur tout le territoire (une trentaine). Tous nécessitent une première ordonnance d'un généraliste ou d'un spécialiste. Attention, les délais pour obtenir un rendez-vous sont longs.

2 QUAND FAUT-IL CONSULTER ?
Quand les crises ne sont pas soulagées par les traitements et perturbent la vie quotidienne. À noter que la survenue d'une céphalée inhabituelle ne doit jamais être banalisée. L'apparition récente et brutale de maux de tête sévères non calmés par les traitements pris à domicile peut constituer une urgence. À Paris, le Centre urgence céphalée (CUC) de l'hôpital Lariboisière, une structure unique créée par le Dr Dominique Valade, est ouvert six jours sur sept de 8 heures à 17 heures. Tél. : 01.49.95.65.37.

3 COMMENT GÉRER LES CRISES ?
En pratique, tenir un agenda des crises (conditions de survenue, durée, intensité...) est très utile pour se rendre compte de l'importance de leur retentissement sur un mois. Une bonne hygiène de vie (sommeil adapté, pratique régulière d'une activité physique) et une bonne gestion du stress (relaxation, yoga...) sont des alliés précieux.

4 COMMENT S'ALIMENTER ?
Pas de liste standard d'aliments à privilégier ou éviter, chaque patient réagissant différemment et connaissant ses propres aliments déclencheurs. à noter que si une tasse de café peut atténuer une migraine, le sevrage peut au contraire déclencher une crise chez les gros consommateurs.
S.-R. M

Le gingembre réveille les papilles

Frais ou séché, le rhizome de cette plante originaire d'Asie est réputé pour son parfum et son goût épicé mais aussi pour ses nombreuses propriétés bénéfiques pour la santé.

Avec sa saveur piquante caractéristique, le gingembre donne de l'exotisme à nos plats et boissons ! Frais, séché, confit ou en poudre, le rhizome de la plante *Zingiber officinale* exalte aussi bien les mets salés que sucrés grâce à son parfum intense. Dans la cuisine japonaise, le gari, du gingembre mariné dans du vinaigre de riz et du sucre, accompagne les fameux sushis. En Inde, c'est un ingrédient de nombreux mélanges comme le masala, en Grande-Bretagne et au Canada, il entre dans la composition du pain d'épices et d'une boisson, le *ginger ale*. Cultivé dans de nombreuses régions tropicales (Chine, Inde, Ceylan, Jamaïque, Afrique de l'Ouest), le gingembre est utilisé depuis des millénaires à des fins thérapeutiques dans les médecines traditionnelles chinoise, tibétaine ou indienne. Au XIIe siècle, la religieuse allemande Hildegarde de Bingen, médecin, naturaliste, en faisait la base de nombreux médicaments anti-infectieux. Outre ses propriétés anti-inflammatoires et digestives, il est recherché pour ses supposées vertus aphrodisiaques en raison de la légère sensation de chaleur qui accompagne sa dégustation. Cap sur cette épice qui réveille si bien nos papilles.

3 millions
de tonnes produites par an dans le monde. (Source : Faostat.)

Il possède un pouvoir antioxydant élevé

Le rhizome du gingembre contiendrait plus de 40 antioxydants (gingérols, shogaols, zingérones), des composés phénoliques de la famille des vanilloïdes qui donnent cette impression de chaleur en bouche. Leur teneur dépend de la nature du gingembre : moulu, il se place au troisième rang des aliments les plus antioxydants (21 571 mmol/100 g) parmi plus de 1000 analysés (chocolat, céréales, fruits et légumes) (1). La concentration en gingérols, un constituant majeur du gingembre, serait de 36 % pour le rhizome frais, contre 17 % sous la forme

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

RHIZOME Tige souterraine, qui porte des racines et des tiges aériennes. Les jeunes rhizomes sont juteux et charnus, avec un goût très doux. Les plus mûrs sont fibreux, presque secs et ont un goût plus prononcé.

ANTIOXYDANTS Composés produits par les végétaux pour se protéger des agressions environnementales. Ils sont capables, lorsque nous les assimilons, de neutraliser les radicaux libres.

THERMOGENÈSE Production de chaleur de l'organisme par augmentation du métabolisme cellulaire. Lorsque la thermogenèse est stimulée, les dépenses énergétiques sont augmentées, limitant le stockage d'énergie sous forme de graisses.

séchée (2). En revanche, la teneur en shogaols serait au contraire plus élevée dans le gingembre séché. La cuisson démultiplierait l'activité antioxydante, car certains composants, résistants à la chaleur, seraient libérés quand ils y sont exposés. En outre, consommer du gingembre en association avec de l'ail ou de l'oignon accroîtrait les effets antioxydants de chacun des condiments.

Il atténue nausées et vomissements

Son usage est reconnu par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) dans la prévention des nausées et vomissements lors de la grossesse, dans le mal des transports et après une intervention chirurgicale. Cet effet antiémétique serait attribué aux gingérols et aux shogaols qui réduiraient les spasmes de l'estomac. Une étude américaine montre que la prise quotidienne de 0,5 à 1,5 g de gingembre pendant les trois jours précédant et suivant une chimiothérapie, en complément de médicaments antinauséeux classiquement prescrits, aiderait à réduire la sévérité des nausées, comparativement au groupe témoin (3).

Il soulage les maux de tête

Les gingérols qui confèrent à l'épice son petit goût piquant auraient des propriétés anti-inflammatoires. L'administration de 250 mg de gingembre en poudre serait aussi efficace que la prise de 50 mg de sumatriptan, un antimigraineux, selon un essai clinique randomisé en double aveugle mené sur 100 personnes souffrant d'une migraine sans aura. Et ce, avec moins d'effets secondaires. Dans le groupe ayant pris du sumatriptan, 20 % ont souffert de vertiges ou de douleurs d'estomac alors que seulement 4 % de ceux qui avaient pris du gingembre ont ressenti une légère indigestion (4).

Il aurait un possible effet sur le cancer

Le potentiel anticancéreux des gingérols a été observé *in vitro*, et une étude a démontré un effet prometteur du gingembre comme agent thérapeutique dans le traitement du cancer de la prostate (5). Par ailleurs, l'épice réduirait de 28 % le niveau d'inflammation intestinale chez les personnes en ayant reçu quotidiennement 2 g moulu pendant 25 jours. Il pourrait donc être un agent préventif du cancer colorectal (6). Toutefois ces résultats demandent à être confirmés.

Il agirait contre le diabète

La consommation quotidienne de 3 gélules de 1 gramme de gingembre en poudre pendant huit semaines a diminué les valeurs de glycémie à jeun et d'hémoglobline glyquée, selon un essai randomisé, en double aveugle, contrôlé par placebo, mené sur près de 88 diabétiques de type 2 (7). De plus, la prise de 2 g par jour de poudre pendant douze semaines améliorerait le taux de triglycérides et la sensibilité à l'insuline (8).

Il faut faire attention à bien le conserver

En poudre, le gingembre se conserve dans un récipient hermétique placé dans un endroit frais et sec, à l'abri de la lumière. Frais, il se garde plusieurs semaines dans le bac à légumes au réfrigérateur voire au congélateur afin de pouvoir le râper plus facilement.
Une consommation excessive peut entraîner des diarrhées légères ou des brûlures d'estomac. Il est aussi déconseillé d'en prendre avant une intervention chirurgicale en raison de ses propriétés anticoagulantes, ni en cas de calculs biliaires. Les personnes suivant un traitement antidiabétique ou antihypertenseur doivent aussi demander un avis médical avant de consommer la racine. ■

Sylvie Boistard

LAËTITIA PROUST-MILLON Diététicienne-nutritionniste à La Brède (Gironde)*

Il stimule la digestion

« Composé à 90 % d'eau, le gingembre est une source de vitamine B9 et A, de sels minéraux et d'oligoéléments comme le cuivre et le magnésium. Mais au regard des quantités ingérées, environ 2 g par jour, ce n'est pas d'un point de vue nutritionnel qu'il est le plus intéressant. En revanche, le rhizome stimule la sécrétion de bile et l'activité de différentes enzymes digestives. L'associer au curcuma, une autre épice aux vertus digestives, augmente la biodisponibilité de cette dernière. Le gingembre aurait également un effet coupe-faim en augmentant la sécrétion de la leptine, l'hormone de la satiété ainsi que des qualités dites brûle-graisses en accroissant la thermogenèse et donc le métabolisme de base. »

* Auteure de *Ma bible de l'alimentation anti-inflammatoire*, Éd. Leduc, 2019.

(1) Content of redox-active compounds in foods consumed in the USA, Halvorsen BL. et al, *Am. J. Clin. Nutr.*, 2006.

(2) Composition and effects on LPS-stimulated PGE2 production, Jolad SD et al., *Phytochemistry*, 2005.

(3) Ginger reduces acute chemotherapy-induced nausea: A URCC CCOP study of 576 patients, Ryan, JL. et al, *Support care cancer*, 2012.

(4) Comparison between the efficacy of ginger and sumatriptan in the ablative treatment of the common migraine, Maghbooli M. et al, *Phytother. Res.*, 2014.

(5) Shogaol from dried ginger inhibits growth of prostate cancer cells both in vitro and in vivo, Saha A. et al, *Cancer Prev. Res.*, 2014.

(6) Study of the Effects of Ginger Root Extract on Eicosanoids in Colon Mucosa in People at Normal Risk for Colorectal Cancer, Zick S. et al, *Cancer Prev. Res.*, 2011.

(7) The effect of ginger powder supplementation on insulin resistance and glycemic indices in patients with type 2 diabetes, Mozaffari-Khosravi H, *The Complement Ther. Med.*, 2014.

(8) Metabolic parameters in subjects with metabolic syndrome, Rahimlou M. et al, *J. Diabetes Metab. Disord.*, 2019.

Covid-19 : les 7 questions de la rentrée

Risque de deuxième vague, efficacité du port du masque, politique de test, immunité, vaccin… Le point sur ce que l'on sait… ou non après l'été.

1 Y aura-t-il une deuxième vague en France ?

Le virus n'est pas près de disparaître et continuera de circuler au moins pendant de longs mois, si ce n'est des années. Mais peut-il, en France, provoquer une nouvelle vague d'infections similaire à celle de mars-avril, menaçant la capacité des hôpitaux à prendre en charge de trop nombreux patients ? C'est *« l'hypothèse la plus probable »* selon le Conseil scientifique qui redoute *« un retour du virus arrivant du Sud pour la période octobre, novembre, décembre, quand nous passerons plus de temps dans les espaces confinés que dehors »*. Sauf que désormais, le pays est bien mieux préparé. Entre le 11 mai, date du déconfinement, et le 15 août, la circulation du pathogène a ainsi été bien contrôlée : plus de 700 foyers (ou *« clusters »*) ont été identifiés et circonscrits grâce au triptyque *« tester, tracer et isoler »* qui permet de couper les chaînes de transmission. Aujourd'hui, plus de 90 000 tests virologiques sont réalisés chaque jour contre moins de 30 000 au mois d'avril. Une force de frappe indispensable… mais insuffisante si la circulation du virus n'est pas en même temps ralentie par le respect des gestes barrières, de la distanciation et du port du masque. C'est ce que montre la résurgence observée chez les 20-40 ans dans les Bouches-du-Rhône et en Île-de-France durant la deuxième quinzaine d'août. Le Conseil scientifique avait d'ailleurs alerté deux semaines avant sur *« la perte accentuée des mesures de distanciation et des mesures barrières »*. C'est un fait, si la première vague est à mettre au compte de l'impréparation du pays, l'ampleur d'une possible deuxième vague dépendra cette fois d'une responsabilité collective qui engage chacun d'entre nous.

2 Quand et où est-il utile de porter un masque ?

Le Sras-CoV-2 se transmet notamment par aérosols, c'est-à-dire des microgouttelettes d'un diamètre de moins de 10 micromètres capables de flotter plusieurs heures dans l'air. Longtemps ignorée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) — entre autres —, cette donnée cruciale fait désormais consensus. Contrairement aux sécrétions plus lourdes du nez et de la bouche qui s'écrasent vite au sol, ces microgouttelettes ont une aire de dispersion bien supérieure au mètre de distance recommandé. En août, une étude américaine a montré que des particules infectieuses pouvaient être retrouvées jusqu'à 5 mètres en quelques minutes seulement et même en l'absence de mouvements dans l'air ambiant. Or il suffit de parler pour émettre ces gouttelettes. Cela signifie que le

Dans les rues très fréquentées, le port du masque a été rendu obligatoire dans de nombreuses villes (ici aux Sables-d'Olonne, en Vendée).

MICHEL LEMOINE/DIVERGENCE - CDC/PHANIE

risque de contamination existe dans tous les espaces clos, quelle que soit la distance entre les personnes. La seule mesure barrière en l'occurrence, c'est le masque, qui devrait donc être porté partout en intérieur. Et il doit recouvrir le nez : une étude américaine publiée en août suggère que les cellules olfactives qu'il abrite seraient le premier site d'entrée et de réplication du virus. La pertinence du masque en extérieur est moins évidente, mais peut se justifier de la même façon si la densité de population est importante.

3 Les jeunes sont-ils finalement des vecteurs de la maladie ?

L'idée selon laquelle les enfants seraient peu malades et transmettraient peu le virus a conduit à la réouverture des écoles en France après le confinement. Toutes les études démontrent bien que les enfants sont moins touchés que les adultes et comptent davantage d'asymptomatiques. Mais les chiffres varient d'un pays à l'autre : les enfants représenteraient entre 2 et 7 % des cas. Les données médicales révèlent également qu'ils sont moins susceptibles de développer des formes sévères, et encore moins de mourir de la maladie. Toutefois, qu'ils soient asymptomatiques ou non, ils pourraient transmettre le virus aux adultes comme aux autres enfants en raison notamment d'une charge virale nasale élevée. Plusieurs études ont démontré que les jeunes âgés de 10 à 19 ans transmettent la maladie aussi fréquemment que les adultes. En revanche, les moins de 9 ans seraient de moins grands vecteurs. Pourtant une petite étude sur 150 individus publiée le 30 juillet dans *JAMA Pediatrics* a livré des résultats surprenants : les plus jeunes participants se sont révélés avoir une charge virale entre 10 et 100 fois plus élevée que les plus âgés !

4 Faudra-t-il dépister toute la population, régulièrement ?

Sachant que la moitié des infections résulterait de personnes qui ne développent pas (ou qui n'ont pas encore développé) de symptômes, le Conseil scientifique appelait dans son avis du 27 juillet 2020 à *« une nouvelle doctrine d'utilisation des tests »* visant, non plus seulement le diagnostic de personnes présentant des symptômes, mais un dépistage massif et généralisé dans la population. *« Il faut rendre les tests plus accessibles au "consommateur" »*, ajoutait le conseil, appelant *« l'ensemble de la communauté virolo-*

gique (à) contribuer à l'évaluation et à la mise en place », de tests salivaires à résultat rapide. Un nouvel outil qui permettrait à tout un chacun de se tester rapidement et — encore mieux — régulièrement. Aux États-Unis, sous la pression de nombreux experts réclamant plus de tests, quitte à ce qu'ils soient un peu moins fiables que ceux disponibles actuellement, la FDA (agence du médicament) a autorisé le 15 août la mise sur le marché d'un test à faire à la maison, qui consiste en une bandelette de papier qui change de couleur en un quart d'heure selon le résultat. La France elle aussi devrait donc bientôt être en mesure d'en proposer afin de contourner les limites logistiques et organisationnelles du prélèvement nasopharyngé et de l'analyse en laboratoire.

5 Existe-t-il un syndrome post-Covid ?

Fatigue intense, douleurs articulaires, maux de tête, perte du goût (agueusie) et de l'odorat (anosmie) durables ou encore gêne respiratoire persistante ; voilà quelques-uns des symptômes que 10 à 15 % des patients censés être guéris du Covid-19 continuent à rapporter durant des semaines voire des mois. Dans la grande majorité des cas, ce « syndrome post-Covid » concerne des patients plutôt jeunes qui ont eu des formes modérées de l'infection. Ils ne présentent pourtant plus aucune trace du virus dans leur organisme ni de complications liées à la maladie. Et personne ne sait encore expliquer ce phénomène. Mais il est étudié de près dans des cohortes de suivi des convalescents constituées pour élucider ce nouveau mystère. Désormais, des consultations spéciales sont mises en place, comme « Réhab-Covid » au service de réadaptation fonctionnelle de l'hôpital Foch (Suresnes, Hauts-de-Seine), qui tente d'accompagner la guérison effective de ces patients.

DENIS MEYER/HANS LUCAS

Le programme de rééducation Réhab-Covid, mis en place à l'hôpital Foch (Suresnes, Hauts-de-Seine), prend en charge des patients atteints de syndromes post-Covid.

6 Les personnes guéries sont-elles immunisées ?

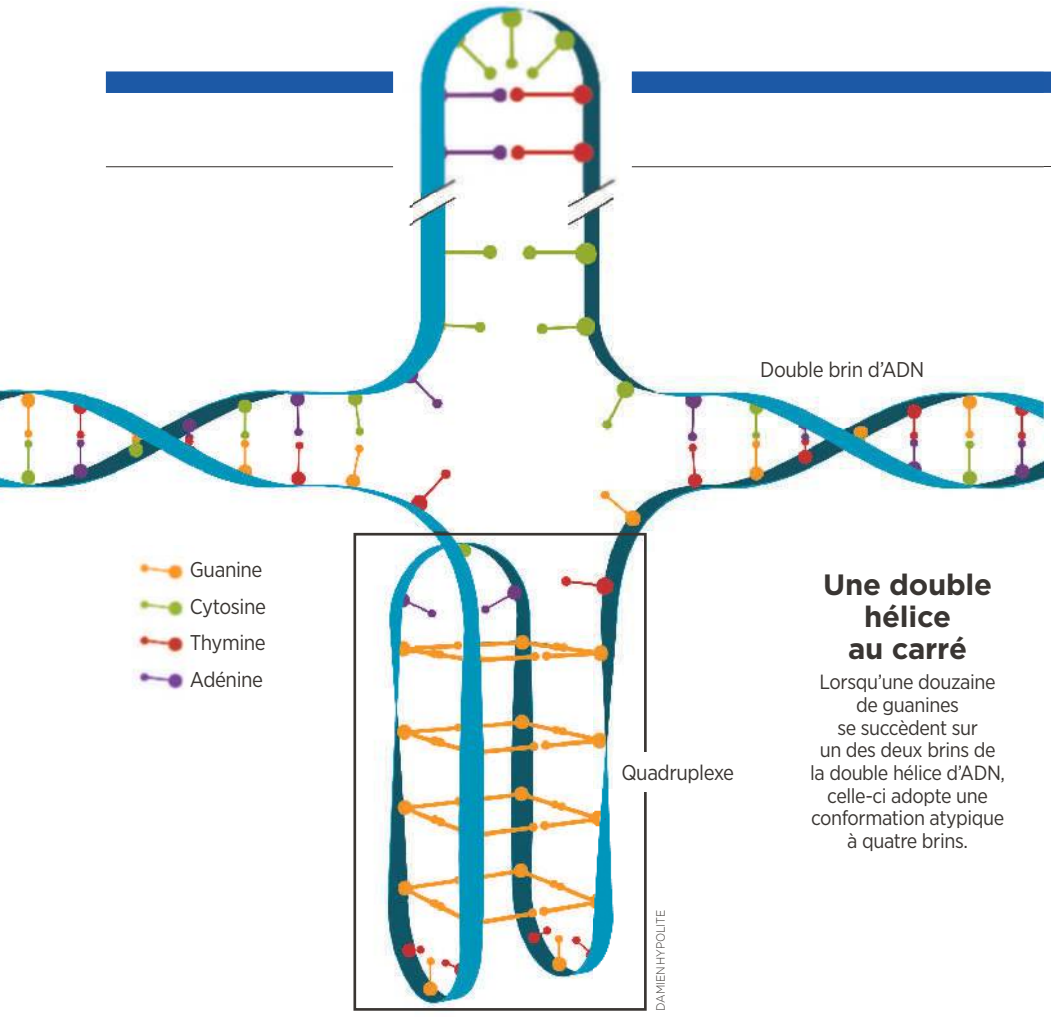
De premiers résultats en provenance de Chine semblent indiquer que les patients infectés par le Sras-CoV-2 développent bien une immunité contre l'infection à ce nouveau coronavirus. Mais il reste toujours à démontrer qu'elle confère une protection efficace. Et si oui combien de temps ? Des travaux portant sur des infections à d'autres souches de coronavirus bénins n'ont pas permis de trancher quant à la durée de l'immunité acquise. Elle n'excéderait pas quelques années en tout cas. Aussi ignore-t-on toujours si une deuxième infection est possible. Enfin, l'exposition à certaines de ces souches de coronavirus bénins dans la petite enfance semble protéger contre d'autres, comme l'a montré une étude néerlandaise en 2011. Mais, à ce stade, impossible de savoir si cette protection s'étend au Sras-CoV-2.

LE + NUMÉRIQUE
Retrouvez sur notre site tous les articles concernant la pandémie de Covid-19, mis à jour quotidiennement : **sciav.fr/Covid-19**

7 Aura-t-on un vaccin cette année ?

Le 11 août, le président russe Vladimir Poutine annonçait que son pays avait achevé la mise au point d'un vaccin contre le Covid-19. Ce que l'OMS n'a pas pu confirmer. Officiellement, mi-août, 29 candidats vaccins étaient testés chez l'humain, et 5 étaient entrés dans la 3e et dernière phrase de tests cliniques (efficacité contre placebo). Et le russe ne fait pas partie de ces derniers. Et le russe ne fait pas partie de ces derniers. Les plus avancés sont ceux de l'alliance BioNTech et Pfizer, de Moderna, de AstraZeneca et CanSino avec l'université d'Oxford, de Sinopharm et Sinovac, deux laboratoires chinois. Les premiers résultats devraient tomber à l'automne. Cette 3e phase permet de tester l'efficacité d'un traitement, une fois son innocuité acquise. Devant l'urgence sanitaire, la plupart des essais vaccinaux encore dans la course ont choisi d'écourter les tests et de passer directement de la phase 1 à cette phase 3 sans passer par une phase intermédiaire censée prouver l'efficacité et définir une dose idéale. Si ces essais sont concluants, il restera à produire en masse et distribuer le vaccin. Une étape qui pourrait prendre deux ou trois mois, soit juste avant la fin de l'année... ■

Hugo Jalinière @HugoJaliniere
et Hervé Ratel



Une double hélice au carré

Lorsqu'une douzaine de guanines se succèdent sur un des deux brins de la double hélice d'ADN, celle-ci adopte une conformation atypique à quatre brins.

Identifier des tumeurs grâce aux nœuds dans l'ADN

Une structure particulière de l'ADN, à quatre brins, serait très fréquente dans les cellules cancéreuses du sein.

Et si le développement de certains cancers pouvait être prédit par des nœuds dans l'ADN ? C'est ce que suggère une étude de l'université de Cambridge (Royaume-Uni) dans le dernier numéro de la revue *Nature Genetics*. Shankar Balasubramanian, professeur de biochimie, et son équipe ont en effet retrouvé de curieuses structures, des quadruplexes d'ADN cubiques, à proximité de biopsies de tumeurs cancéreuses du sein. Ce n'est pas la première fois que l'équipe de Cambridge met la main sur de tels quadruplexes. Elle en a même fait sa spécialité et traque depuis une dizaine d'années dans notre organisme cette structure qui intrigue les chercheurs du monde entier.

La formation de ces arrangements cubiques repose essentiellement sur leur composition majoritaire en guanine, l'une des quatre briques élémentaires de l'ADN (avec l'adénine, la cytosine et la thymine). Normalement chacune de ces bases présente une affinité particulière avec une autre. Mais, si la guanine a une affinité pour l'adénine, elle en a aussi pour elle-même ! C'est pourquoi les quadruplexes se forment spontanément dans des zones de l'ADN riches en guanine. Comme l'a expliqué Shankar Balasubramanian : « *Nous sommes familiers avec la représentation classique de la structure en double hélice de l'ADN. Mais, durant la dernière décennie, il est devenu très clair que l'ADN existe aussi sous la forme d'une structure à 4 brins qui semble jouer un rôle important dans la biologie humaine. Nous avons constaté que ces structures sont très fréquentes dans les cellules de cancer du sein.* »

Pouvoir proposer un traitement plus efficace

Bien plus, les chercheurs ont trouvé que les quadruplexes adoptaient une forme légèrement différente en fonction du sous-type de tumeur. D'où l'idée qu'en identifiant précisément à quel type de quadruplexe le médecin a affaire, celui-ci pourra en déduire le type de tumeur concerné et ainsi proposer un diagnostic plus précis ainsi qu'un traitement plus efficace et ciblé qu'actuellement. Plusieurs médicaments conçus pour cibler spécifiquement ces structures hétéroclites sont d'ailleurs à l'étude. Ainsi le Quarfloxin, développé initialement par le laboratoire américain Cylene, qui s'attache aux quadruplexes, les empêchant de se lier aux enzymes de réplication. Résultat : les cellules cancéreuses ne peuvent plus se multiplier et enclenchent leur apoptose (leur programme de suicide). Une piste prometteuse mais, pour l'instant, ces médicaments sont encore au stade des études cliniques, et semblent encore manquer de spécificité en ciblant tous les quadruplexes et pas seulement ceux liés aux cancers. ■ **Hervé Ratel**

MAURO GRIGOLLO / PLAINPICTURE

Le petit noir, en quantités raisonnables, peut tout à fait avoir sa place dans un régime sain.

Ce que l'on sait des effets du café sur la santé

Une vaste étude révèle les conséquences multiples de la consommation de cette boisson sur l'organisme.

Des chercheurs de l'école de santé publique de l'université Harvard, à Cambridge (États-Unis), viennent de publier dans le *New England Journal of Medicine* une vaste revue portant sur 95 études et méta-analyses de la littérature scientifique consacrée à la troisième boisson la plus consommée au monde (après l'eau et le thé). Voici ce qu'il faut en retenir.

Nous ne sommes pas tous égaux devant la caféine

Ses effets excitants dépendent du temps que met la molécule pour perdre son activité pharmacologique. Chez un adulte en bonne santé, elle est divisée par deux en 2 heures et demie à 4 heures et demie selon les personnes. Mais les scientifiques ont observé que cette durée est divisée par deux chez les fumeurs ou, au contraire, multipliée par deux avec une contraception orale ! Elle atteint même 15 heures chez les femmes enceintes au troisième trimestre de la grossesse. La caféine peut par ailleurs ralentir la croissance fœtale et augmenter le risque de fausse couche.

Les habitudes de consommation sont conditionnées par la génétique

La tolérance aux effets psychoactifs de la caféine dépend notamment de variations du gène CYP1A2, qui régit la production d'une enzyme hépatique clé dans l'élimination de certaines molécules. Ainsi, les personnes ayant un métabolisme plus lent ont tendance à compenser par une consommation plus faible. Autrement dit, les buveurs de café tendent à s'autoréguler en fonction des principaux effets indésirables : troubles du sommeil, nervosité, anxiété…

Le café n'accroît pas le risque de maladies cardio-vasculaires

Certes, en tant qu'excitant, la caféine tend à augmenter le taux d'adrénaline et donc la pression sanguine. Mais il s'agit d'un effet à court terme et qui tend à disparaître par effet d'accoutumance chez les consommateurs réguliers. Par ailleurs, le café contient bien d'autres composés, dont des polyphénols qui réduisent le stress oxydatif.

Le café semble protéger de certains cancers

Boire trois tasses par jour — environ 100 mg de caféine, soit un expresso (4-5 centilitres), 35 cl de café instantané ou 25 cl de café filtre — est associé à une diminution de 40 % du risque de carcinome hépatocellulaire, le cancer du foie le plus fréquent. Et à une légère diminution des cancers de la peau, du sein et de la prostate. *« Boire entre trois et cinq tasses par jour est toujours associé à une diminution du risque de maladies chroniques »*, concluent les auteurs. S'il n'est pas forcément recommandé, le café est tout à fait compatible avec un mode de vie sain. ■

Hugo Jalinière @HugoJaliniere

Votre salle de bains
peut être dangereuse...

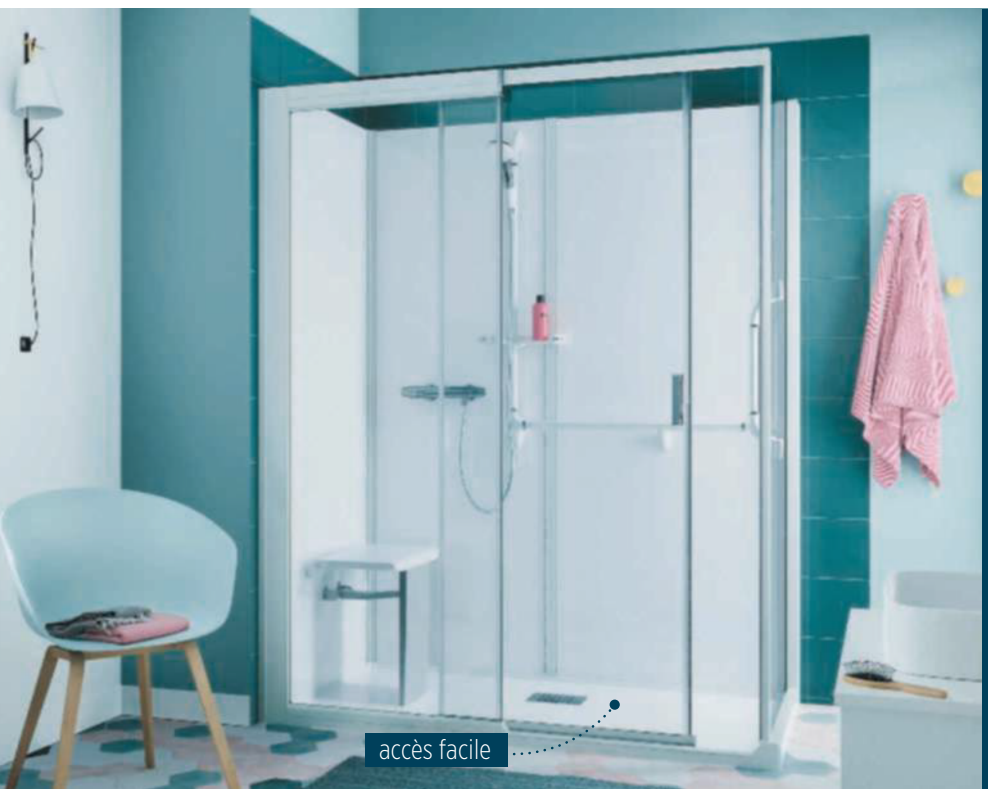
Kinemagic

UN PRODUIT KINEDO

remplace votre baignoire par une douche à l'italienne

en 48H **pour 0€**

pas d'argent à avancer avec l'aide de ActionLogement



Évitez les chutes avec
une douche
facile d'accès,
design et luxueuse.
Un produit français

Kinedo

Fabrication française

DEVIS GRATUIT

par téléphone
0 800 05 06 07 Service & appel gratuits

par internet
www.kinemagic.fr

par courrier
en retournant la demande de devis personnalisé et gratuit

Coupon à envoyer à :
AQUAPRODUCTION
LIBRE RÉPONSE 51045
44680 SAINTE PAZANNE

PROFITEZ DU PLAN NATIONAL « salle de bains » JUSQU'À 5000€ D'AIDE

❑ Oui, je souhaite en savoir plus sur la douche Kinemagic et bénéficier d'un devis gratuit sans engagement de ma part.

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

CP : ..... Ville : .....

Téléphone : .....

Email : .....

N'affranchissez pas ce courrier, nous vous offrons les frais postaux.

Kinemagic - Sciences & Avenir

La transition écologique prend l'avion

Les vols moyen-courriers devront atteindre le « zéro carbone » en 2050 selon l'objectif fixé par les pouvoirs publics. Si moteurs et carburants doivent s'adapter, les verrous technologiques sont nombreux.

Par Loïc Chauveau @Loic_Chauveau

ANTOINE GONIN/SAFRAN

La suppression du carénage couplée à l'adoption de moteurs de fort diamètre : c'est la solution privilégiée par le français Safran avec son « open rotor » pour accroître la poussée sans brûler d'avantage de carburant (ici en phase de test dans la soufflerie de Modane en Savoie).

Du vert dans le ciel ? L'aéronautique entame un virage très serré sur l'aile vers sa transition écologique. La démarche, déjà entamée dans les laboratoires et ateliers des grands constructeurs, a pris une tout autre ampleur à la lueur de la crise sanitaire du coronavirus et de ses conséquences économiques. Si l'État français a versé ce printemps 15 milliards d'euros à la filière pour sauver ses 300 000 emplois, il a en effet assorti cette aide d'une contrepartie drastique : développer un avion moyen-courrier — dont le rayon d'action est d'environ 5000 kilomètres — sans émissions de CO_2 en 2035 et atteindre le « zéro carbone » en 2050, ce qui signifie que les émissions non évitables devront être compensées par des plantations d'arbres, par exemple. Mission impossible ?

En théorie, le secteur pèse peu dans le bilan mondial des émissions de gaz à effet de serre (GES). L'aviation civile émet 1,1 milliard de tonnes de CO_2 par an, soit 2,6 % des 37 milliards de tonnes relâchées par les énergies fossiles tous les ans dans le monde. Mais en réalité, il faut multiplier par deux à trois son effet sur le climat du fait de l'impact bref mais violent des émissions en haute altitude d'oxydes d'azote, de vapeur d'eau et de particules qui composent les traînées des avions. De plus, le transport aérien a accru considérablement ses émissions ces dernières années avec une hausse de 7 % du trafic par an dans le monde et de plus de 4 % en France.

7 %
La hausse annuelle moyenne du trafic aérien (avant la crise du Covid-19).

1,1 milliard de tonnes
Les émissions de gaz à effet de serre annuelles dues au transport aérien.

80 %
La réduction de la consommation des moteurs déjà acquise depuis les débuts de l'aviation commerciale à réaction.

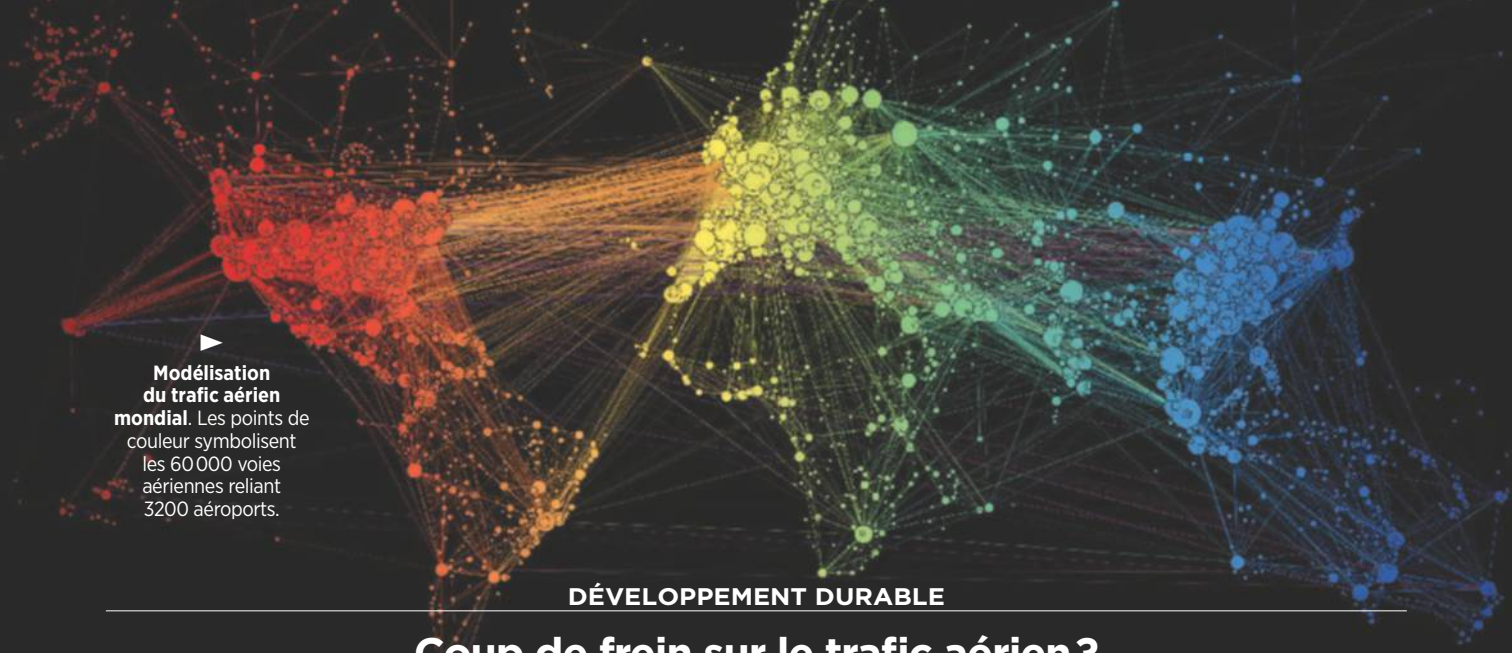
Les moteurs thermiques restent incontournables

Sommés de corriger leur copie, les constructeurs aéronautiques font face à un défi inédit. L'enjeu se porte principalement sur les motorisations mais les ingénieurs ont, pour l'heure, peu de solutions car seuls les moteurs thermiques peuvent actuellement emporter 300 personnes à 10 000 mètres d'altitude et à 1000 km/h. Stéphane Cueille, directeur de la recherche et innovation chez Safran, constructeur, en coentreprise avec l'américain General Electric, de 70 % des moteurs des moyen-courriers dans le monde, ne cache pas que l'échéance de 2035 est une gageure : « *Nous allons poursuivre les travaux d'amélioration des moteurs actuels, explorer les voies de l'hybridation avec des moteurs électriques, analyser la disponibilité des carburants de synthèse ou issus de la biomasse et envisager à un peu plus long terme l'arrivée de l'hydrogène* », affirme-t-il cependant. Depuis le premier avion de ligne à turboréacteur, le De Havilland Comet mis en service en 1952, ce type de propulsion a beaucoup gagné en efficacité si bien que les appareils de dernière génération comme l'Airbus A320neo (2014) consomment 80 % de carburant en moins. « *Une bonne partie de ce gain provient de la conception des moteurs*, détaille Philippe Novelli, directeur de programme « aviation verte » à l'Office national d'études et de

Des réacteurs aux pales en composite placés à l'extrémité du fuselage : l'« open rotor » réduirait la consommation de 30 %.

SAFRAN

recherches aérospatiales (Onera). *Et en particulier de l'augmentation de ce que l'on nomme le taux de dilution. Il s'agit d'accroître le flux extérieur d'air froid accéléré par le moteur et de faire en sorte qu'il s'engouffre dans le réacteur et non dans la chambre de combustion, contrairement au flux "chaud" qui participe à la combustion avec le kérosène et entraîne la machine.* » Ce qui a pour effet d'augmenter la poussée sans consommation supplémentaire de carburant. « *Les tout derniers modèles ont un taux de dilution de 10, ce qui signifie que 10 % seulement de l'air entre dans la chambre de combustion, les 90 % restants ne faisant que traverser le réacteur* », complète Stéphane Cueille. Ce qui implique d'augmenter leur taille qui est passée d'un mètre de diamètre dans les années 1960 à près de 2 mètres aujourd'hui, obligeant les constructeurs à de multiples contorsions pour placer ces gros volumes sous les ailes. Comment aller plus loin ? En enlevant le carénage qui enveloppe les pales à l'avant du réacteur, estiment les motoristes. Safran mise sur cette rupture technologique pour réduire encore de 30 % la consommation et descendre bien en dessous de 2 litres de kérosène par passager pour 100 kilomètres parcourus contre 2,3 litres aujourd'hui. « *L'open rotor a une architecture composée* ▶



Modélisation du trafic aérien mondial. Les points de couleur symbolisent les 60 000 voies aériennes reliant 3200 aéroports.

MARTIN GRANDJEAN

DÉVELOPPEMENT DURABLE

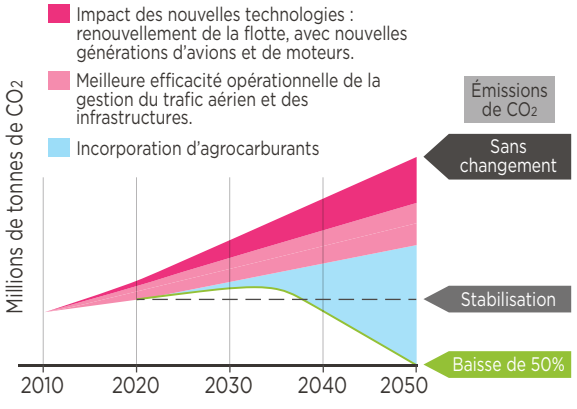
Coup de frein sur le trafic aérien ?

Depuis les débuts de l'aviation commerciale, le secteur a connu une croissance continue. En 2018, plus de 20 000 avions ont transporté 4,3 milliards de passagers. Avant la crise du Covid-19, Airbus anticipait un besoin de près de 40 000 avions d'ici à 2038. « *Il faut se poser la question de l'utilité*, assure Julien Carey, professeur à l'Institut national des sciences appliquées (Insa) de Toulouse qui forme des ingénieurs aéronautiques. *70 % des passagers voyagent pour leurs loisirs souvent pour des séjours courts.* » Julien Carey est membre de l'Atelier d'écologie politique de Toulouse qui questionne le développement aéronautique de la capitale de l'Occitanie et propose sa reconversion vers des productions plus utiles. La fondation Supaero-décarbo, qui regroupe des anciens élèves de cette école d'aéronautique, s'interroge aussi sur la finalité de leur travail dans un monde affecté par le changement climatique. La Convention des citoyens, qui a rendu ses conclusions en juin, plaide aussi pour une limitation du transport aérien et propose l'interdiction de toutes nouvelles infrastructures aéroportuaires comme le Terminal 4 en projet à Roissy. La décision du gouvernement en mai de supprimer toutes les lignes intérieures dont le trajet peut être effectué en train en moins de 2 h 30 min constitue peut-être pour l'aéronautique civile le premier coup de frein depuis Pierre-Georges Latécoère.

d'un couple d'hélices en composite tournant en sens inverse l'une de l'autre sans aucune enveloppe », décrit Stéphane Cueille. Le moteur fait près de 4 mètres de diamètre ce qui suppose de changer son emplacement, à l'arrière du fuselage par exemple. De l'autre côté de la Manche, dans son usine de Bristol (Royaume-Uni), Rolls Royce parie également sur l'allègement des pales de turbine grâce aux composites. Selon, le constructeur britannique ces nouveaux matériaux devraient alléger les avions de 700 kg en moyenne, soit l'équivalent de sept passagers et de leurs bagages. C'est peu... mais c'est pourtant ce que le constructeur met en avant pour montrer qu'il emprunte bien la voie du « zéro carbone » comme il s'y est engagé en 2020 en adhérant au pacte de l'ONU fédérant les entreprises et collectivités ayant décidé de décarboner totalement leur activité d'ici à 2050.

On le voit bien : il s'agit là de gains « à la marge ». Pour être plus efficace, il va falloir changer les carburants. Et là... les solutions sont encore moins nombreuses ! La plus évidente est celle des agrocarburants dits de deuxième génération, du biogazole en l'occurrence. Car les constructeurs le savent : la première génération utilisant des huiles de colza ou de tournesol est condamnée pour cause de concurrence avec l'alimentaire et de mauvais bilan des émissions de GES. La deuxième génération utilisant des déchets agricoles et des graisses évite ces écueils. En France, le programme BioTFuel démarré en 2010 a atteint la phase préindustrielle en 2019 sur le site BioNext de Dunkerque. Air France teste également depuis le début de cette année un carburant à base de graisse animale sur sa ligne San Francisco-Paris, « *parce qu'en Californie un fournisseur nous garantit les quantités demandées, ce qui n'est pas le cas ailleurs*, précise Nathalie Simmenauer, directrice développement durable d'Air France. *Nous nous sommes par ailleurs engagés à intégrer 2 % de ces carburants dans tous nos vols d'ici à 2025, notamment grâce à la*

Comment baisser les émissions de CO_2 du transport aérien



BRUNO BOURGEOIS / SOURCE : SAFRAN

Pour une baisse de 50 %, nouveaux moteurs et meilleure gestion du trafic doivent impérativement se combiner avec les agrocarburants.

construction d'une bioraffinerie aux Pays-Bas en 2021. »
Les capacités de production seront-elles suffisantes ? L'ONG The Shift Project, présidée par Jean-Claude Jancovici, a des doutes. « *L'incertitude est forte concernant leur disponibilité pour se substituer au pétrole fossile* » affirme Shift project. Ce que conteste Stéphane Cueille : « *Les calculs réalisés par l'organisation de l'aviation civile internationale (OACI) montrent que 500 millions de tonnes seront nécessaires pour l'aérien en 2050 si le secteur poursuit sa croissance actuelle. C'est loin d'être hors de portée. L'automobile consomme aujourd'hui 100 millions de tonnes d'agrocarburants de première génération. Nous avons trente ans pour développer la seconde.* » D'autant que les constructeurs lorgnent vers des filières moins au point mais qui permettraient de conserver le moteur thermique, comme le e-carburant : l'électrolyse de l'eau produit de l'hydrogène qui, marié à du CO_2 capté par exemple auprès d'industries, donne ce carburant susceptible d'être brûlé dans des moteurs classiques.

L'hydrogène sera peut-être la solution du futur

Autre voie possible : l'hybride où des moteurs électriques améliorent le fonctionnement du thermique et prennent le relais dans les roulages au sol dans les aéroports. L'Onera et Airbus ont ainsi développé le projet Maveric qui ambitionne de baisser de 20 % la consommation de carburant fossile. Le premier vol de ce démonstrateur de 2 mètres de long pour 3,2 m de large a eu lieu en juin 2019. Surtout, il y a l'hydrogène pur. Ce carburant est certes très énergétique, mais difficile à manier car la molécule est très légère. Il faut donc la liquéfier, une opération qui impose de descendre à -253 °C comme sur les lanceurs Ariane 5 et 6. « *Mais son usage nécessite des réservoirs quatre fois plus volumineux que ceux du kérosène* », constate Philippe Novelli. L'hydrogène est donc envisagé pour un horizon lointain, bien au-delà des quinze ans imposés par le gouvernement pour sortir un avion commercial propre. Le vert dans le ciel... ce n'est pas pour tout de suite. ■

ONERA

Dragon, un avion à propulsion électrique imaginé par l'Onera. Une perspective encore très lointaine...

AIRBUS

Le démonstrateur Maveric d'Airbus adopte une forme d'aile volante pour réduire les émissions de 20 %.

TECHNOLOGIE

L'impasse électrique

En juin, le Pipistrel Velis Electro a été le premier avion tout électrique au monde à recevoir sa certification de vol. Ce même mois, la société américaine Magnix a réussi à faire voler un Cessna électrique à la vitesse de 200 km/h. Chez Dassault Aviation, le planeur électrique Euroglider est testé depuis 2019. Mais l'essor de ces petits avions est freiné par le poids des batteries à embarquer. La solution n'est donc pas envisagée pour l'aviation commerciale qui nécessite des batteries cinq fois plus puissantes. Pour l'instant, une impasse technique.

RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS
Inspirés du cerveau humain, ils sont très utilisés dans les algorithmes d'IA, par exemple pour l'apprentissage et la reconnaissance d'images. Ils sont organisés en couches de « neurones » qui s'échangent l'information par des « synapses ».

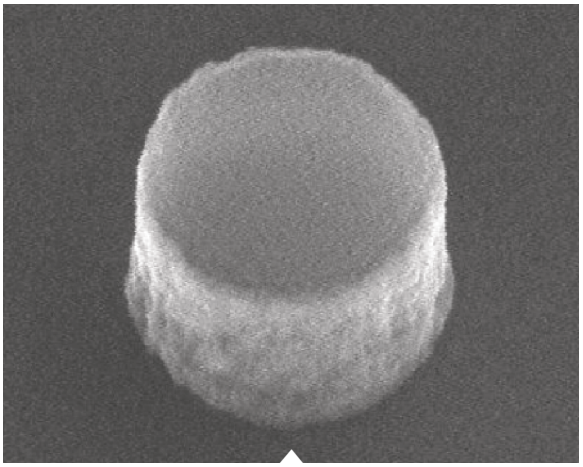
PUCE NEUROMORPHIQUE À la différence des puces de l'électronique actuelle, qui séparent mémoire et calcul, elle dispose d'une architecture inspirée du cerveau qui groupe mémoire et calcul à travers des nanosynapses et nanoneurones.

ÉLECTRONIQUE DE SPIN (SPINTRONIQUE)
Les électrons peuvent être considérés comme des mini-aimants dont le magnétisme est représenté par leur spin. Ce spin peut prendre deux orientations opposées exploitées en spintronique pour coder l'information.

L'électronique s'inspire des connexions du cerveau

Avec le développement de l'intelligence artificielle, l'utilisation des transistors et mémoires dans les composants physiques atteint ses limites. L'électronique neuromorphique veut imiter les réseaux de neurones pour démultiplier les possibilités.

« Il y a dix ans, quand j'ai commencé ma carrière, *je devais presque cacher ce que je faisais, tant cela semblait ringard !* », se souvient Damien Querlioz, chargé de recherche CNRS en nanoélectronique au CN2, à l'université Paris-Saclay (Essonne). Aujourd'hui, ses travaux sur l'électronique dite neuromorphique sont au cœur d'une des plus grandes révolutions qu'ait connues l'électronique depuis son apparition au début du XXe siècle. « *Toutes les grandes sociétés comme Google, Facebook, Apple ou encore Microsoft ont lancé des projets dans ce domaine. C'est réconfortant de voir que notre vision a fini par être adoptée* », se réjouit le scientifique dont les recherches ouvrent la voie à un développement toujours plus exponentiel de l'intelligence artificielle (IA).

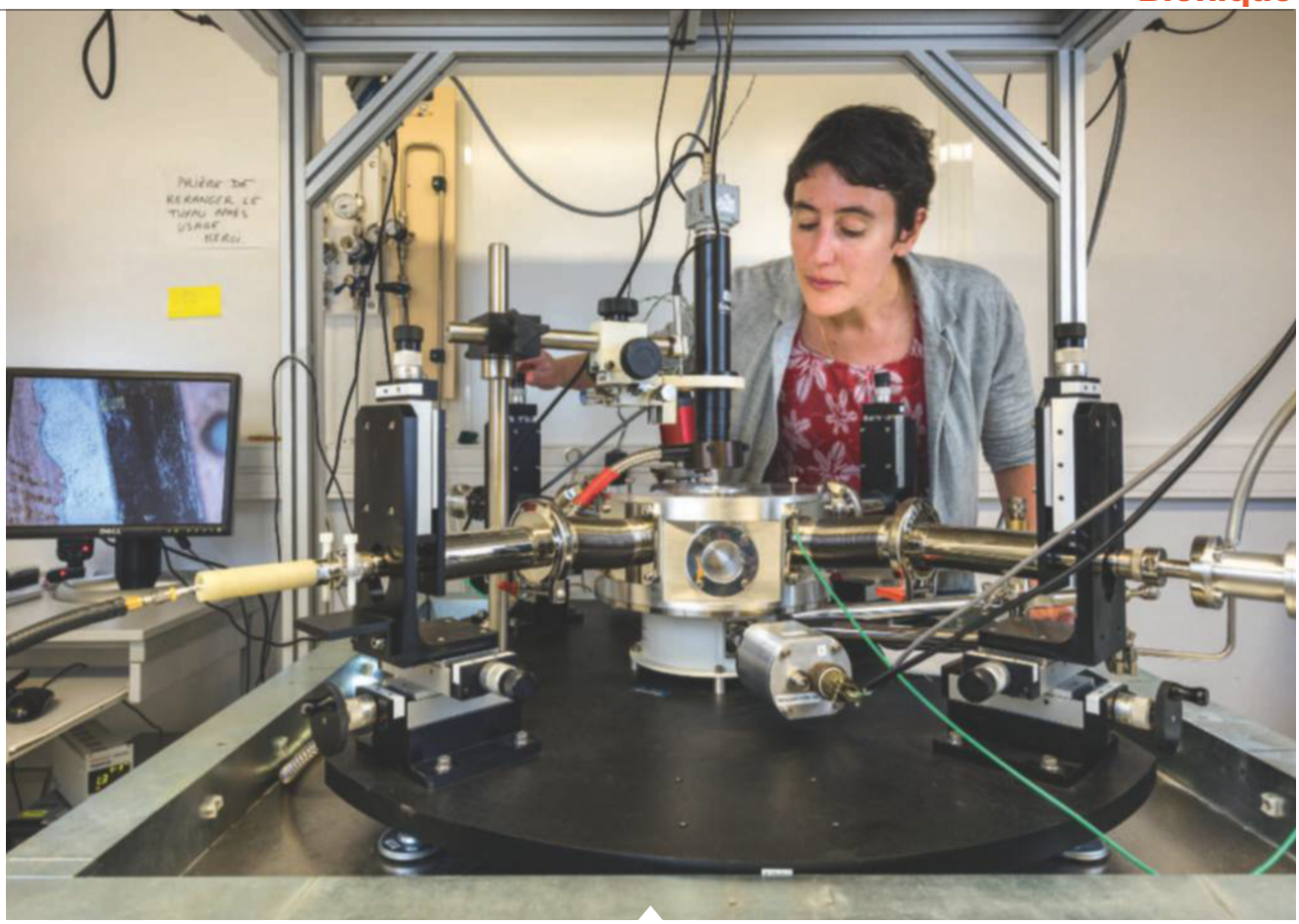


AIST

Ce nanoneurone artificiel, développé par des chercheurs français (CN2, Palaiseau), a été capable de reconnaître des chiffres, de 0 à 9, prononcés par différentes personnes.

Rapprocher la mémoire du calcul

« *L'électronique neuromorphique s'inspire du cerveau pour concevoir une électronique nouvelle, fondée sur des réseaux de neurones* », explique Julie Grollier, spécialiste du domaine et directrice de recherche à l'unité mixte de physique CNRS/Thales à Palaiseau (Essonne). Certes, l'idée, née au début des années 1980, n'est pas nouvelle, mais elle était tombée en désuétude faute de besoins. Jusqu'à la réémergence de l'intelligence artificielle ces dernières années ! « *Les algorithmes d'IA utilisent une architecture fondée sur les réseaux de neurones artificiels. Mais, pour l'heure, ils fonctionnent à l'aide de l'électronique conventionnelle, qui n'est pas adaptée* », poursuit la chercheuse. En d'autres termes, le matériel n'est pas en adéquation avec le logiciel. Pour bien comprendre cela, il faut s'imaginer le fonctionnement d'un réseau de neurones artificiels d'IA entraîné pour reconnaître une image, celle d'un chat par exemple. L'algorithme est constitué de plusieurs couches de neurones virtuels, reliées entre elles. Ces liaisons constituent des sortes de « synapses » qui — par analogie avec le cerveau — assurent la connexion entre deux neurones artificiels. En fonction de l'image présentée, certains neurones de la première couche s'activent, émettant des signaux de nature variable (plus ou moins forts, plus ou moins activateur ou inhibiteur...) vers la deuxième couche par l'intermédiaire des synapses. Les neurones artificiels de la deuxième couche font alors la synthèse des signaux reçus et sont activés ou non. Et ainsi de suite. Au final, le réseau de neurones peut conclure de cette série d'activations que l'image présentée est ou non celle d'un chat. Pour ce faire, il doit avoir appris préalablement à reconnaître des images de chat et à en mémoriser les éléments à travers les synapses qui transmettent des signaux variables



LAURENT THION/ECLIPTIQUE

Julie Grollier (CNRS/Thales, Palaiseau) travaille à la mise au point très complexe de puces neuromorphiques utilisant la spintronique.

entre les couches de neurones. Ainsi, *grosso modo*, par analogie avec le cerveau, il est possible de dire que les synapses artificielles stockent l'information (mémoire) alors que les neurones sont les calculateurs ou processeurs.

Rien de tel avec l'électronique conventionnelle qui équipe actuellement tous les ordinateurs et smartphones du marché : le stockage de l'information et le calcul y sont physiquement séparés. L'information est enregistrée dans des mémoires et le calcul réalisé par des processeurs composés de transistors. Problème : cette architecture est totalement inadaptée au fonctionnement des algorithmes d'IA. « *Les réseaux de neurones d'IA gèrent des centaines de millions de paramètres. Pour les entraîner ou les mettre en action, il faut réaliser un grand nombre d'opérations qui consistent à chercher les paramètres stockés dans la mémoire pour les amener au processeur où le calcul est réalisé. Celui-ci effectué, les résultats retournent dans la mémoire pour y être conservés et ainsi de suite… pour des millions d'opérations ! Or, ce transfert d'informations entre la mémoire et le processeur consomme énormément d'énergie, à tel point que cela représente aujourd'hui un problème environnemental et un coût considérable qui freine le développement de l'IA* », explique Julie Grollier. L'objectif de l'électronique neuromorphique est donc de supprimer ces transferts en rapprochant la mémoire du calcul. Ce qui revient à concevoir une électronique dont l'architecture imite les réseaux de neurones, avec de nouveaux composants d'échelle nanométrique : nanoneurones et nanosynapes, pour remplacer transistors et mémoires habituels. Ces composants sont des « memristors » (mot-valise formé avec mémoire et « *resistor* », résistance). Ils stockent l'information en modifiant leur résistance, c'est-à-dire en laissant plus ou moins bien passer le courant. Il est donc ainsi possible de coder l'information.

Plusieurs matériaux sont étudiés pour réaliser ces nanoobjets, notamment des oxydes de métaux comme l'oxyde de hafnium. « *Quand celui-ci est traversé par un courant, les atomes forment des sortes de filaments conducteurs qui favorisent son passage, diminuant donc la résistance. À l'inverse, un courant opposé dissout ces filaments, augmentant ainsi la résistance* », explique Damien Querlioz. Les chercheurs ont déjà réalisé des circuits à base d'oxydes de hafnium. Mais pour le moment ces nanocomposants sont surtout des synapses, adaptées à l'utilisa-

1000 KWh

L'énergie consommée par le cerveau humain pendant six ans contre 80 heures pour l'électronique conventionnelle (1 carte graphique faisant tourner des algorithmes d'IA).

1 million de fois plus petite

La surface d'une puce avec les nanocomposants. par rapport à une puce électronique classique.

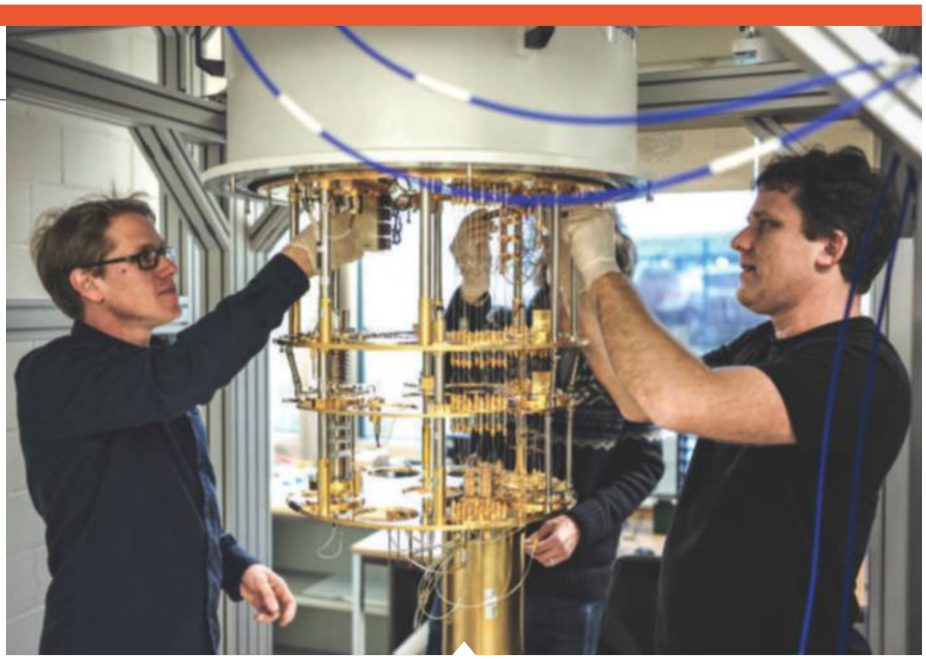
tion de ces matériaux, les neurones étant plus complexes à mettre au point. En effet, l'utilisation des oxydes repose sur des déplacements d'atomes, ce qui provoque inéluctablement un vieillissement du matériau. « *Ce n'est pas un problème pour les nanosynapses, car elles sont peu sollicitées. En revanche, les nanoneurones sont constamment activés* », poursuit le chercheur.

L'électronique de spin, une voie prometteuse

Une autre voie semble donc plus prometteuse pour les neurones, celle dite de l'électronique de spin. « *Le spin est en fait le champ magnétique des électrons. Sous l'influence d'un courant, il peut être orienté dans deux sens opposés. Mais l'idée reste la même : en changeant le spin, la résistance varie, ce qui permet de coder l'information* », précise Julie Grollier. À la différence des oxydes de métaux, ces matériaux dits de spintronique sont plus adaptés aux neurones car les changements de spin n'affectent pas la matière. Problème : il est difficile de trouver des nanosynapes compatibles avec des nanoneurones. « *Les procédés de fabrication sont très complexes, surtout si on n'utilise pas les mêmes matériaux. Il faut donc parvenir à faire les deux composants avec les mêmes matériaux pour pouvoir les assembler* », poursuit la chercheuse. Mais les premiers résultats sont là ! Les équipes de Julie Grollier et Damien Querlioz ont montré qu'un circuit de quatre neurones spintroniques pouvait reconnaître des voyelles, selon une étude publiée en 2018 dans *Nature*. « *Nous travaillons maintenant sur une puce comportant une centaine de nanoneurones et nanosynapses spintroniques pour réaliser des tâches beaucoup plus complexes. Par exemple, l'analyse d'imagerie médicale utilisant des micro-ondes à la place des rayons X* », précise Damien Querlioz. Selon les chercheurs les premières puces neuromorphiques à base d'oxyde de métaux devraient arriver sur le marché d'ici à cinq ans, celles exploitants la spintronique dans dix ans.

Avec une telle révolution, l'électronique va non seulement gagner en énergie, mais aussi en taille et donc en puissance. Ces nanocomposants étant mille fois plus petits que les transistors de l'électronique actuelle, il est possible de réduire la surface d'une puce d'un facteur 1 million. Ainsi, on pourra placer beaucoup plus de composants sur une même puce de 1 cm². De quoi imaginer des applications aujourd'hui hors de portée : « *Cela permettrait d'embarquer à bord d'un véhicule autonome, toute l'information et l'intelligence artificielle nécessaires* », explique Julie Grollier. À quand l'acquisition d'une propriété importante du cerveau : la plasticité neuronale ? À savoir sa capacité à se transformer pour apprendre, mémoriser, s'adapter à une nouvelle tâche. Ce serait la naissance d'une électronique malléable, capable de s'auto-organiser et donc de décupler ses capacités. ■

Olivier Hertel @OlivierHertel



QUANTUM RESEARCH LAB/IBM

Si la factorisation de grands nombres est une opération maîtrisée par l'ordinateur quantique (ici celui d'IBM), l'électronique neuromorphique est plus adaptée à la reconnaissance d'image, comme le cerveau.

SUPERCALCULATEURS

Le match neuromorphique contre quantique

Un ordinateur fondé sur l'électronique neuromorphique pourrait-il rivaliser avec une machine quantique ? En fait, la question ne se pose pas vraiment, tant les tâches qu'ils ciblent sont différentes. Grâce à sa puissance de calcul considérable due à ses qubits ou bits quantiques, le second peut coder l'information non plus sous forme de 0 ou de 1 (bits), mais d'un grand nombre de ces valeurs en même temps. De quoi exceller dans les opérations complexes comme la factorisation de grands nombres, base de la cryptographie, une opération hors de portée du cerveau. Un ordinateur neuromorphique devrait quant à lui s'illustrer dans les tâches plus « cérébrales » comme la reconnaissance d'image.

M. LECOMPT/UPSUD

« Nous travaillons sur une puce pour réaliser des tâches telle l'analyse d'imagerie médicale utilisant des micro-ondes »

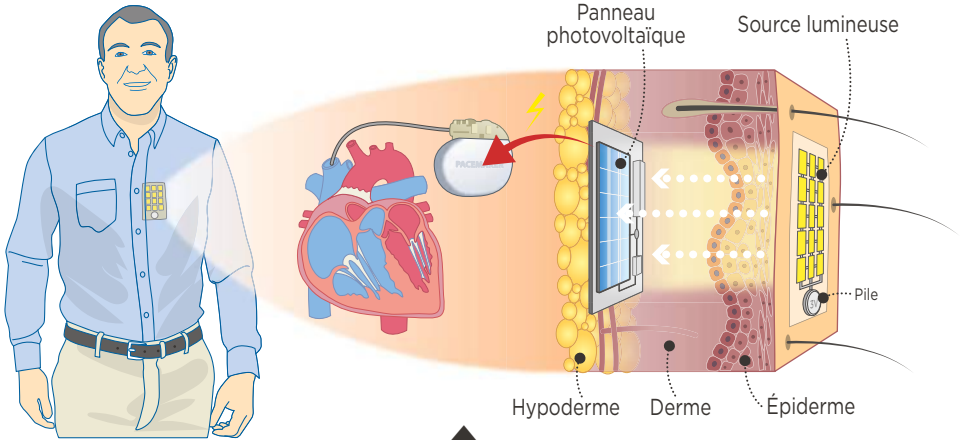
Damien Querlioz, chargé de recherche CNRS en nanoélectronique au CN2 (Centre de nanosciences et de technologies, université Paris-Saclay, Essonne)

Un panneau photovoltaïque dans le corps

Cette source d'énergie solaire permettrait d'alimenter des implants médicaux, comme des stimulateurs cardiaques.

IMPLANTER des panneaux photovoltaïques sous la peau. L'idée vient d'être exposée très sérieusement dans la revue américaine PNAS, par des chercheurs de l'Institut des sciences et technologies et de l'Institut de recherche énergies solaires et durables à Gwangju (Corée du Sud). Ces capteurs solaires fourniraient l'électricité nécessaire à l'alimentation d'implants médicaux électroniques : stimulateur cardiaque, stimulateur cérébral, voire de nouvelles puces permettant de faire du suivi de patients en analysant *in situ* certains marqueurs biologiques. Tous ces dispositifs exigent en effet une alimentation électrique fournie généralement par une pile au lithium embarquée sur l'implant. Problème : cette pile doit être remplacée au bout de quelques années, ce qui impose une nouvelle chirurgie.

C'est pour éviter ces interventions que les chercheurs coréens ont misé sur le panneau photovoltaïque qui, comme sur le toit d'une maison, convertit l'énergie lumineuse en électricité. Positionné à quelques millimètres sous la peau, il pourrait recevoir assez de lumière pour alimenter, par exemple, les électrodes d'un stimulateur cardiaque auquel il serait associé sur un implant. Selon la longueur d'onde et la puissance de la source, les photons traversent assez facilement les tissus vivants. Pour s'en convaincre, il suffit d'occulter complètement avec ses doigts le faisceau d'une puissante lampe torche pour constater que la lumière reste visible à travers la chair.



Sous les vêtements, les diodes de la source lumineuse (un patch collé sur la peau) émettront des photons qui traverseront l'épiderme et le derme. Ceux-ci seront captés par le panneau photovoltaïque implanté sous la peau qui convertira l'énergie lumineuse en électricité pour alimenter l'implant médical. Le dispositif n'a pour l'instant été testé que chez l'animal.

BRUNO BOURGEOIS

Des LED pour compenser l'absence de lumière la nuit

Cette approche présente cependant des inconvénients importants. Elle fonctionne uniquement si les surfaces ne sont pas couvertes par les vêtements, et donc essentiellement le visage et les mains. Or ceux-ci sont potentiellement éloignés des organes ciblés par la stimulation électrique comme le cœur. En outre, les apports d'énergie lumineuse risquent d'être insuffisants en intérieur voire nuls pendant la nuit. L'équipe coréenne a alors pensé à associer le panneau photovoltaïque à une source lumineuse permanente. En l'occurrence, de petites diodes placées sur un patch souple plaqué sur l'épiderme, symétriquement fixé face au panneau implanté sous la peau. Les LED sont alimentées par une pile facile à changer puisque accessible à l'extérieur.

Pour l'heure, les scientifiques ont réussi à faire la preuve de leur concept chez l'animal en alimentant un stimulateur cardiaque implanté chez la souris grâce à un panneau de 4 mm sur 8 mm. Mieux : ils ont utilisé un support métallique souple pour leur patch, qui dissipe la chaleur émise par les diodes évitant ainsi de brûler la peau. Ils espèrent maintenant que leur technologie pourra être testée chez l'humain et à terme, industrialisée. ■

Olivier Hertel
@OlivierHertel

Le temps de la maturité pour les trottinettes électriques

Le succès grandissant de ces petits véhicules à deux roues s'explique par le progrès des batteries lithium-ion, de l'électronique de commande et des moteurs électriques qui marient autonomie et fiabilité.

Rangées pendant le confinement, les trottinettes électriques sont de retour. Ainsi, à Paris, la mairie a désigné cet été les trois opérateurs (l'américain Lime, l'allemand Tier et le néerlandais Dott) qui pourront déployer leur flotte en libre-service durant les deux prochaines années. 15 000 engins vont pouvoir circuler dans la capitale et disposeront d'emplacements matérialisés au sol pour être garés sur la chaussée. Au niveau mondial, ces flottes pourraient représenter un marché de 35 à 45 milliards d'euros en 2025, selon une récente étude du Boston Consulting Group.

La vente aux particuliers redémarre aussi. Déjà, en 2019, le marché avait bondi de 105 % en France, pour atteindre les 478 000 exemplaires. Il sera désormais porté par la recherche de modes de transport individuel en milieu urbain, pour des trajets courts, faciles à utiliser et moins polluants que les véhicules thermiques. Aux côtés des vélos à assistance électrique, ces petits deux-roues, dont le prix va de quelques centaines à quelques milliers d'euros, sont donc promis à un bel avenir.

478 000

Le nombre de trottinettes électriques vendues en France en 2019.

Le phénomène a beau paraître récent — les flottes en libre-service sont apparues à la fin des années 2010 —, la technologie, elle, ne l'est pas. De premiers essais concluants de patinettes motorisées et pliables ont en effet été menés dès les années 1920 par l'américain Autoped avec un moteur thermique puis par l'allemand Krupp avec un moteur électrique. Des policiers et postiers américains les ont même brièvement utilisées ! Détrôné par la voiture, l'objet, cette fois sans moteur, a ensuite été cantonné pendant des décennies dans les coffres à jouets. Avant d'intéresser à nouveau les adultes à partir des années 1990, à la suite de l'émergence de modèles ultralégers et faciles à transporter.

Les constructeurs cherchent à améliorer leur durabilité

Aujourd'hui, si les modèles dits mécaniques, non motorisés, restent majoritaires dans les ventes aux particuliers (1,2 million écoulés en 2019 dans l'Hexagone) leur part relative baisse au profit des électriques. Et ce grâce aux progrès des batteries lithium-ion, de l'électronique de commande et des moteurs électriques. Les constructeurs cherchent désormais à améliorer l'autonomie de leurs engins mais aussi leur durabilité, notamment en protégeant mieux batterie et moteur contre les intempéries.

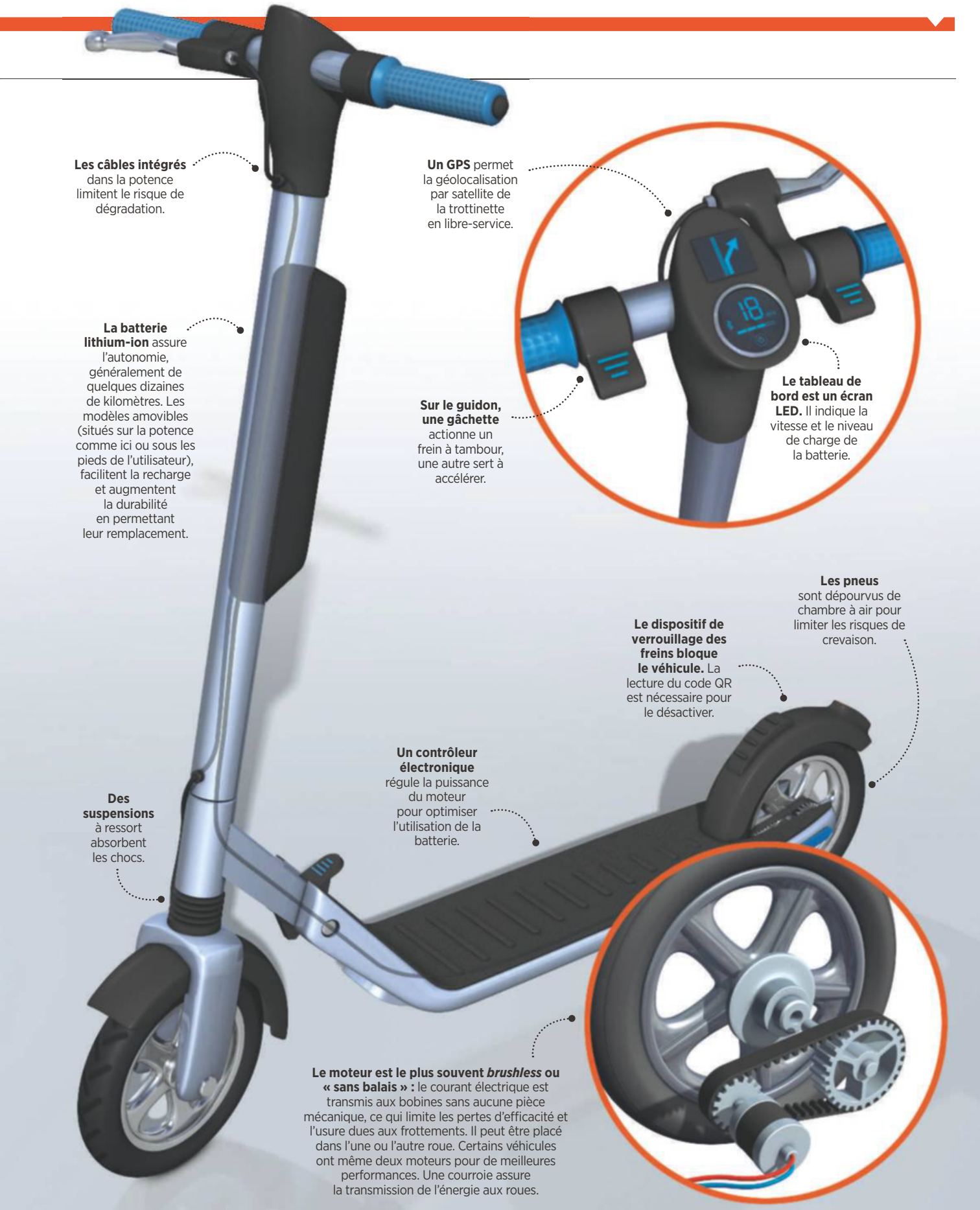
En France, les trottinettes ont officiellement fait leur entrée dans le code de la route en octobre 2019. Leur vitesse est depuis limitée à 25 km/h et elles doivent être équipées de bandes réfléchissantes ainsi que d'un avertisseur sonore. Enfin, leur conduite — obligatoirement sur les pistes cyclables là où elles existent — est réservée aux personnes âgées de plus de 12 ans. ■ **Muriel de Vericourt**

BRUNO BOURGEOIS POUR S. ET A.

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Vers des engins autonomes

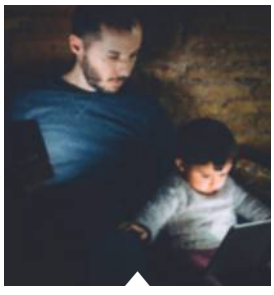
Et si les trottinettes se rendaient seules à leur lieu de recharge ? Une telle innovation éviterait les tournées de camions destinées à collecter les véhicules en libre-service pour les recharger, et faciliterait la vie des usagers. C'est la raison pour laquelle Segway — qui a par ailleurs cessé la commercialisation de son célèbre gyropode cet été — a présenté l'été dernier un engin capable de se déplacer seul. Stabilisé par une paire de roues à l'avant, il embarque un système de pilotage reposant sur des technologies d'intelligence artificielle comparables à celles utilisées dans les voitures autonomes. De son côté, la société GoX teste en Géorgie des véhicules téléopérés, capables de venir à leurs utilisateurs pour leur éviter d'avoir à les chercher dans les rues !


Les câbles intégrés dans la potence limitent le risque de dégradation.
La batterie lithium-ion assure l'autonomie, généralement de quelques dizaines de kilomètres. Les modèles amovibles (situés sur la potence comme ici ou sous les pieds de l'utilisateur), facilitent la recharge et augmentent la durabilité en permettant leur remplacement.
Des suspensions à ressort absorbent les chocs.
Un GPS permet la géolocalisation par satellite de la trottinette en libre-service.
Sur le guidon, une gâchette actionne un frein à tambour, une autre sert à accélérer.
Le tableau de bord est un écran LED. Il indique la vitesse et le niveau de charge de la batterie.
Le dispositif de verrouillage des freins bloque le véhicule. La lecture du code QR est nécessaire pour le désactiver.
Les pneus sont dépourvus de chambre à air pour limiter les risques de crevaison.
Un contrôleur électronique régule la puissance du moteur pour optimiser l'utilisation de la batterie.
Le moteur est le plus souvent *brushless* ou « sans balais » : le courant électrique est transmis aux bobines sans aucune pièce mécanique, ce qui limite les pertes d'efficacité et l'usure dues aux frottements. Il peut être placé dans l'une ou l'autre roue. Certains véhicules ont même deux moteurs pour de meilleures performances. Une courroie assure la transmission de l'énergie aux roues.

Du bon usage des écrans dans l'apprentissage

Séverine Ehrel et Serge Tisseron, tous deux spécialistes du cerveau et des technologies, battent en brèche les accusations contre les écrans dans ce grand entretien avec « Sciences et Avenir-La Recherche ». Ils montrent, études à l'appui, leurs bénéfices… à condition de respecter certaines règles, surtout chez les plus jeunes.

Dialogue animé par Elena Sender @ElenaSender



GEMMA FERRANDO/WESTEND61/PLAINPICTURE

Les enfants apprennent mieux des médias lorsque les parents s'impliquent et les accompagnent dans leur activité.

Les smartphone, ordinateur, tablette… nuisent-ils à l'attention, indispensable à l'apprentissage, notamment chez les plus jeunes ?

Séverine Erhel : On évoque souvent le fameux mythe du poisson rouge, qui prétend que l'être humain face aux technologies numériques a une capacité attentionnelle de 8 secondes, inférieure à celle d'un poisson rouge. Mais cette idée provient d'une étude de Microsoft (2015) jamais publiée dans une revue à comité de lecture ! L'attention a plusieurs formes : « sélective », qui permet d'inhiber des facteurs pour se concentrer sur d'autres ; « divisée », qui traite divers types d'information à la fois ; « soutenue », qui maintient un niveau d'efficience élevé pour rester concentré. Aucun consensus scientifique à ce jour ne permet d'établir que l'écran nuit à l'une de ces composantes.

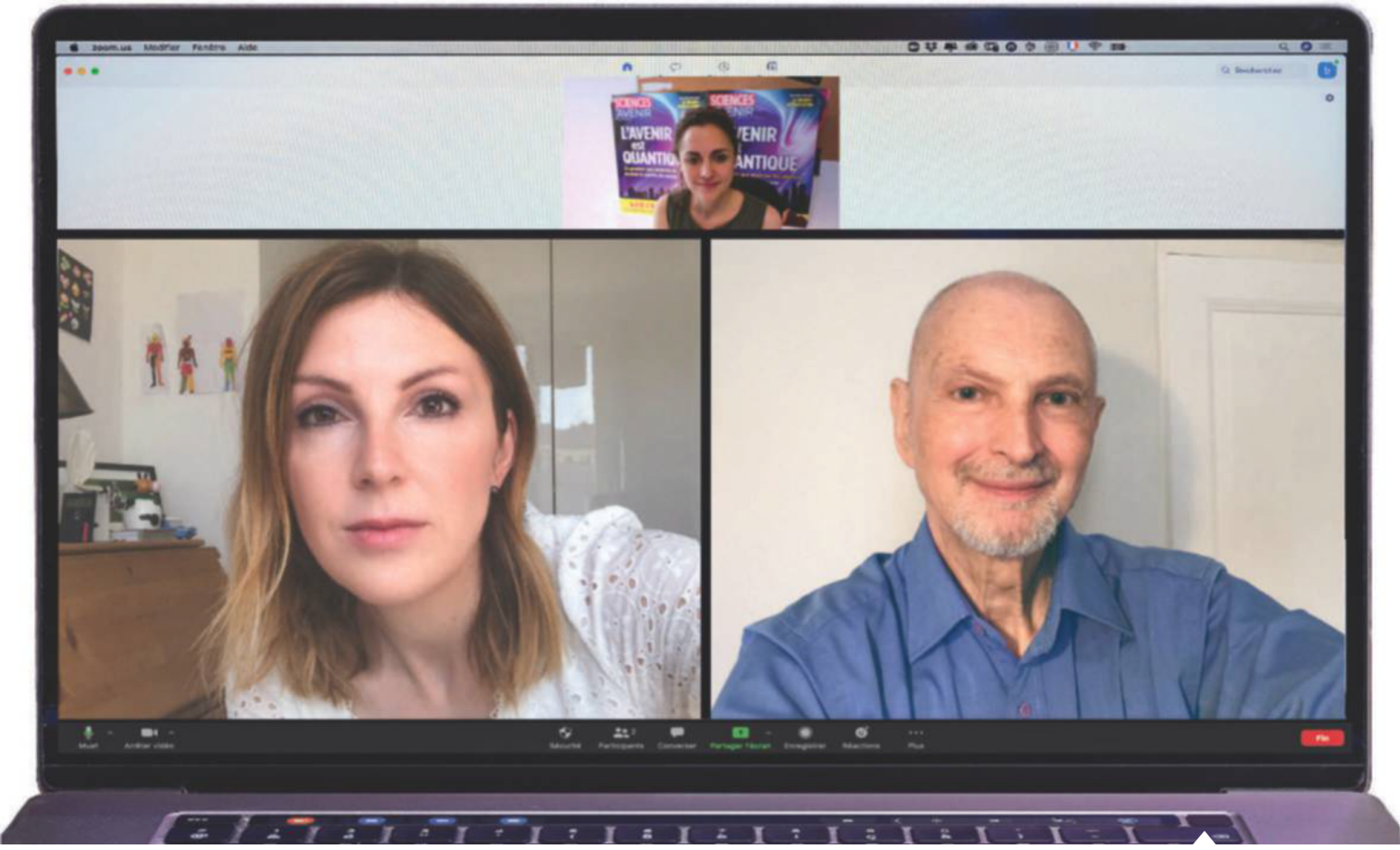
Serge Tisseron : Seule une étude coréenne, menée chez des enfants d'école élémentaire, relève une corrélation statistique entre usage des smartphones et hyperactivité et inattention *(Byun et al., 2013)*. Mais une corrélation n'est pas une causalité ! Le problème est surtout préoccupant pour les jeunes enfants. Les écrans proposent des produits très colorés, mouvementés et bouleversants, conçus pour capter l'attention. Une autre étude longitudinale [suivi d'une population dans le temps] *(Hinkley et al., 2014)* associe l'usage de l'ordinateur et d'Internet chez des enfants de 2 à 6 ans avec des troubles plutôt de nature émotionnelle, probablement du fait des contenus.

N'y a-t-il pas aussi des effets négatifs sur l'acquisition du langage ?

S. E. : Il peut y avoir des bénéfices sur le langage — ou pas — en fonction des contenus présentés aux enfants, selon une méta-analyse d'une quarantaine d'études *(Madigan, McArthur, Anhorn, Eirich, et Christakis, 2020)*. Les effets bénéfiques adviennent si des contenus éducatifs sont proposés sur des durées modérées (une à deux heures par jour) et avec l'accompagnement des parents.

Avec toutes les aides numériques actuelles (répertoire, GPS, notes…), n'est-on pas en train de perdre la mémoire ?

S. T. : Depuis que les chauffeurs de taxi londoniens utilisent le GPS, ils sont passés de repères visibles dans leur environnement proche à chaque instant — comme des magasins et des monuments — à des repères dits géocentrés, avec une mémoire surplombante plutôt qu'attachée à des repères de proximité. Leur capacité de mémorisation s'est donc modifiée, elle ne s'est pas perdue ! La mémoire à court terme pourrait d'ailleurs être augmentée par la pratique de 45 minutes quotidiennes de jeux vidéo *(Boot et al., 2008)*. Évidemment, si on y passe 3 heures par jour, il peut aussi y avoir des inconvénients. Par ailleurs, chez des



PHOTOS ET MONTAGE RÉALISÉS PAR BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

Séverine Erhel (à gauche), docteure en psychologie, maître de conférences en psychologie cognitive et ergonomie à l'université Rennes 2, et **Serge Tisseron**, psychiatre, docteur en psychologie, membre de l'Académie des technologies, ont apporté leur expertise au cours d'un débat sur l'impact des écrans sur les plus jeunes animé par notre journaliste **Elena Sender** (en haut).

adultes jouant à Super Mario 64 trente minutes par jour, on observe des modifications des régions du cerveau impliquées notamment dans la formation de la mémoire, la planification stratégique et la motricité fine, qui sont des modifications bénéfiques *(Kühn et al., 2013)*.

S. E. : D'autres améliorations sont très spécifiques aux fonctions cognitives sollicitées par le jeu comme l'a montré une étude *(Adams and Mayer, 2014)* citant les travaux de Daphné Bavelier, de l'université de Genève (Suisse). En jouant à Tetris par exemple, on va noter une amélioration de la capacité de rotation mentale (par exemple emboîter mentalement des formes comme dans certains casse-tête) mais il n'y aura pas d'effet sur les autres habiletés cognitives. Et ce niveau de compétence diminue si l'on cesse de jouer, à cause de la plasticité cérébrale. Ces effets supposés bénéfiques des jeux vidéo sont encore discutés *(Hilgard, Sala, Boot, & Simons, 2019)*.

Comment résister à la tentation de jouer à son jeu vidéo préféré alors qu'on devrait travailler ?

S. T. : La première marche dans l'autorégulation, c'est la capacité d'attendre. Et cela s'apprend ! Pour le jeune enfant, les parents doivent limiter les temps d'écran, mais aussi fixer un horaire dans la journée. On mange à heures fixes, et cela doit être similaire pour les écrans. L'OMS a introduit en 2018 dans la Classification internationale des maladies, le *gaming disorder*, ou « trouble du jeu vidéo » décrit par la perte de tout autre centre d'intérêt pendant plus d'un an. Mais l'existence de troubles mentaux tels que psychose et dépression joue un rôle important dans cet engagement morbide, avec une influence réciproque, les uns aggravant les autres. Des facteurs génétiques aussi probablement.

Globalement, ce qu'on reproche aux écrans résulterait donc finalement du manque de socialisation ?

S. E. : C'est la théorie dite du déplacement avan-

« On peut avoir — *via* l'écran — des activités d'apprentissage »
Dr Séverine Erhel

cée par Neumann en 1989 qui stipule que chaque minute consacrée à des activités sur écran ne l'est pas, par exemple, à la socialisation ou nuit aux apprentissages. Mais une équipe de chercheurs d'Oxford *(Przybylski, Orben, & Weinstein, à paraître)* bat en brèche cette théorie en montrant que l'on peut avoir — *via* l'écran — des activités de socialisation ou d'apprentissage.

S. T. : Certes, mais le transfert d'apprentissage est favorisé par le caractère interactif du support, notamment s'il se rapproche des performances en situation réelle *(Troseth et al., 2006 ; Lauricella et al., 2010)*, et par l'accompagnement : les enfants apprennent mieux des médias lorsque les adultes qui s'occupent d'eux s'engagent activement et conjointement dans l'activité *(Parish-Morris et al., 2013 ; Lovato & Waxman, 2016)*. Inversement, les études de la Canadienne Linda Pagani (2010, 2016) montrent un lien négatif entre le temps passé seul devant la télévision avant 3 ans et les habiletés sociales et l'autonomie pendant l'enfance. Le choix des activités et l'accompagnement jouent un rôle majeur.

S. E. : Pour les adolescents, les chercheurs d'Oxford cités plus haut ont observé qu'un usage des écrans de 1 à 2 heures par jour favorisait le bien-être émotionnel et social chez les adolescents. Alors qu'au-delà de 4 heures on commence à observer des associations négatives. Ils défendent, tout comme je le fais, la théorie dite de Boucles d'or, c'est-à-dire la modération.

S. T. : *Boucles d'or et les trois ours* est un conte dans lequel une petite fille aux cheveux blonds entre dans la maison de trois ours (un petit, un moyen, un grand) et choisit le bol, la chaise et le lit qui conviennent à sa taille. Cette métaphore est utilisée dans le rapport de l'Unicef de 2017 « Grandir dans un monde numérique ».

Avec un usage « Boucles d'or », le « problème » des écrans est-il donc résolu ?
S. E. : Non car de nouveaux problèmes apparaissent. On peut ainsi s'inquiéter de l'augmentation des jeux dits *free-to-play* comme le fait Joël Billieux, professeur de psychologie clinique à l'université de Lausanne (Suisse). Se présentant comme gratuits, ils poussent en réalité à faire des microtransactions pour continuer à jouer. Aujourd'hui, on ne sait pas s'ils mènent à des usages problématiques car on ne connaît pas encore tous les effets des *dark patterns* qu'ils utilisent. C'est-à-dire des interfaces utilisateurs qui

s'appuient sur les biais cognitifs des joueurs, pour les piéger, en leur faisant acheter des choses ou livrer des informations personnelles.

S. T. : Ces nouveaux jeux exploitent en effet cinq biais cognitifs dont le FoMO (*Fear of Missing Out*), ou peur de manquer des événements exceptionnels. Ce sont ces mêmes biais qui sont exploités par les jeux de hasard et d'argent, avec cependant une différence essentielle : les joueurs de jeux vidéo ont beaucoup d'autres centres d'intérêt et motivations à jouer ! Quoi qu'il en soit, seuls ceux ayant la capacité de comprendre ces enjeux et leurs risques peuvent s'en prémunir. Le législateur devrait obliger les fabricants à donner ces informations.

S. E. : Il faut aussi que les parents jouent avec leurs enfants, pour leur expliquer les mécanismes cachés et également leur apprendre à « quitter » le jeu.

Vous pensez donc que les parents doivent revenir dans le jeu ?
S. T. : Les parents doivent d'abord contrôler leurs propres usages. Utiliser son smartphone tout en parlant ou en jouant avec un enfant lui assure un

LE + NUMÉRIQUE
À LIRE : la version intégrale du débat sur notre site **sciencesetavenir.fr**

TETRA/BSIP

Le temps passé devant un écran doit être limité. Il est important de fixer un horaire dans la journée et que les parents jouent avec l'enfant pour lui apprendre à « quitter » le jeu.

moindre soutien éducatif *(Radesky et al., 2014)*. Il peut en résulter un sentiment d'abandon *(Beamish, Fischer and Rowe, 2018)*. Il faut des règles familiales : pas d'utilisation d'écrans durant les repas pris en commun et pas de smartphone dans les chambres pour éviter les troubles du sommeil. Et bien sûr accompagner. Ce sont les trois principes des balises 3-6-9-12 (pour chaque âge) que j'ai proposées en 2008 : alternance, accompagnement et apprentissage de l'autorégulation.

S. E. : On peut dire que l'écran ne doit se substituer ni au temps de famille, ni au temps de sommeil, ni aux relations interpersonnelles. C'est une activité parmi d'autres, et il y a tellement d'autres choses à faire ! ■

« Utiliser son smartphone tout en parlant ou en jouant avec un enfant lui assure un moindre soutien éducatif »

Dr Serge Tisseron

PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA *

Opinion, altruisme et vaccination

Un vaccin est nécessaire pour mettre fin à la crise sanitaire du Covid-19 que nous vivons actuellement, personne n'en disconvient. Pourtant, même si des expérimentations en prouvent tout à la fois l'innocuité et l'efficacité, rien ne nous assure que la population l'acceptera. Des sondages d'opinion conduits au plus fort de la pandémie, en avril, montraient qu'un quart des Français manifestait déjà leur hostilité au point de refuser de se faire vacciner ; un nouveau sondage effectué en juillet indique que cette proportion croît et s'élève à un tiers. Dans la mesure où l'on administre le vaccin à des personnes saines non pour les guérir mais pour les prémunir contre la maladie, on conçoit qu'un risque, même infime, d'intolérances graves soit perçu comme inadmissible. Or, les différentes phases de l'expérimentation clinique sont là pour prouver l'absence d'effets indésirables néfastes. C'est le respect de ces procédures de validation qui explique tout à la fois le coût de la recherche et le temps nécessaire à la mise au point d'un vaccin. Il n'y a donc pas lieu de s'inquiéter pour soi-même. À cela, il faut ajouter que la protection apportée par un vaccin dépend de la couverture vaccinale, à savoir du pourcentage de la population qui est vacciné. C'est tout particulièrement le cas avec le virus Sras-CoV-2 puisque les moins de 60 ans sont moins vulnérables, alors qu'ils véhiculent la maladie et que celle-ci peut atteindre et emporter les plus âgés qui sont généralement moins protégés par le vaccin en raison d'une baisse physiologique de l'immunité. Si l'on souhaite sortir de cette crise sanitaire, il faudrait donc que la vaccination devienne obligatoire, ce qui accroîtra encore l'animadversion. Rappelons qu'on ne se vaccine pas pour soi, mais pour les autres. Face à un fléau comme une pandémie, l'individu ne peut se contenter d'une attitude égoïste ; il doit faire preuve de solidarité. La vaccination est un impératif éthique !

> « Rappelons qu'on ne se vaccine pas pour soi mais pour les autres »

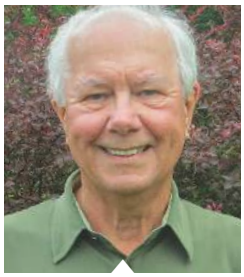
BRUNO LÉVY

* Président du comité d'éthique du CNRS, professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS). Dernier ouvrage publié : *Le Mythe de la singularité. Faut-il craindre l'intelligence artificielle ?* Le Seuil, 2017.

La Recherche

« Les six âges de l'incertitude »

Le mathématicien Ian Stewart explore dans « Les dés jouent-ils aux dieux ? » (Dunod) la façon dont les humains ont tenté de prévoir l'avenir à travers le temps.



AVRIL STEWART

Ian Stewart, professeur à l'université de Warwick (Royaume-Uni), est l'auteur de nombreux articles et d'ouvrages de vulgarisation scientifique. Parmi les plus connus : *17 Équations qui ont changé le monde* (2014, Robert Laffont), *Dieu joue-t-il aux dés ?* (2014, Flammarion) ou encore *Mon Cabinet de curiosités mathématiques* (2013, Flammarion).

« Décrire de manière lisible, informative et non technique, les nombreuses façons dont les mathématiques sont désormais utilisées pour comprendre, quantifier, gérer et réduire l'incertitude. Tel est l'objectif que j'ai poursuivi en décrivant ce que j'ai appelé les *"six âges de l'incertitude"* qui représentent les nombreuses approches que l'humanité a développées pour faire face à ce qu'elle ne peut pas prévoir. Mais même les meilleures méthodes ne peuvent pas éliminer complètement l'incertitude ! Et c'est tant mieux, car la vie serait très ennuyeuse si nous savions tout à l'avance… Ainsi, dans le 1er âge, l'incertitude a été considérée comme le caprice des dieux, des démons ou d'autres êtres surnaturels. Pour tenter de les convaincre de leur être favorables, les humains ont notamment utilisé des méthodes magiques de divination. Le 2e âge est celui de la science : nous découvrons que certaines choses que nous pensions imprévisibles ne le sont pas. Par exemple, il est possible de prévoir les marées plusieurs mois à l'avance. Puis ce fut le 3e âge, celui des probabilités. En évaluant la probabilité d'un événement et en développant des méthodes de calcul, nous sommes à même d'évaluer les chances de succès ou d'échec et de gérer les risques. Mais nous avons découvert ensuite que le monde, à ses plus petites échelles, est irréductiblement imprévisible : c'est le 4e âge, celui du quantique… Avant d'entrer dans le 5e âge, celui de la théorie du chaos qui stipule que même lorsque vous connaissez les lois et que celles-ci sont déterministes, vous ne pourrez peut-être pas pour autant prédire l'avenir avec précision. Car les erreurs d'observation augmentent de façon exponentielle ! Enfin, le 6e âge fait la synthèse de toutes les méthodes ci-dessus (hormis la première). Toutes peuvent être combinées pour un bénéfice mutuel : les statistiques peuvent être utilisées pour améliorer les prévisions météorologiques fondées sur une dynamique chaotique, par exemple. Le chaos pourrait expliquer l'étrangeté du monde quantique, etc.

Cependant, une chose demeure : l'humain n'est pas un animal rationnel. Nous avons évolué pour prendre des décisions instantanées… sur la base d'informations insuffisantes ! En fait, nous avons toujours tendance à rechercher des preuves qui valident notre décision et à rejeter le reste. C'est ce qu'on appelle le biais de confirmation. Nos cerveaux sont ainsi des machines de décision dites bayésiennes [du mathématicien Thomas Bayes au XVIIIe siècle], qui analysent le monde sur la base de croyances préexistantes : si quelque chose de nouveau correspond à nos croyances, celles-ci en sont renforcées. Si ce n'est pas le cas, nous ne croyons pas aux preuves. Ainsi, si des éléments semblent montrer qu'un ovni supposé est en réalité un ballon-sonde utilisé par un gouvernement pour une expérience secrète [affaire Roswell aux États-Unis en 1947], celui qui ne croit pas aux ovnis ajoute ces informations au poids de la preuve que ceux-ci n'existent pas ; alors que celui qui y croit rejette ces éléments, les considérant comme de la propagande officielle pour dissimuler l'existence d'*aliens*. Pour se protéger de ces erreurs de raisonnement, il a donc fallu mettre en place une méthode systématique — la méthode scientifique — grâce à laquelle la science a fait d'immenses progrès. Elle nous permet de distinguer la bonne science de la mauvaise. Prenons l'exemple de la

EXTRAIT

[…] Les croyances associées aux dieux devinrent ainsi liées à des impératifs moraux. Finalement, un nombre croissant de gens commencèrent à penser que des systèmes de croyances aussi accommodants n'expliquaient rien du tout. Si le ciel était bleu parce que les dieux l'avaient fait ainsi, il aurait aussi bien pu être rose ou violet. L'humanité se mit alors à explorer une façon différente de penser le monde, fondée sur le raisonnement logique confirmé (ou infirmé) par l'observation. Ce fut la science. Elle explique le bleu du ciel par la diffusion de la lumière par de fines poussières présentes dans la haute atmosphère. Cela n'explique pas pourquoi le bleu semble bleu : les neuroscientifiques travaillent sur ce sujet, mais la science n'a jamais prétendu tout expliquer…

Les dés jouent-ils aux dieux ? Ian Stewart, Dunod, 352 p., 23,90 €

US DEPARTMENT OF ENERGY / IDAHO NATIONAL LABORATORY/ SCIENCE PHOTO LIBRARY

Dans son dernier ouvrage, Ian Stewart retrace les efforts de la pensée humaine pour faire des prévisions, à l'aide des mathématiques, sur tout ce qui est incertain (ici, étude de l'énergie géothermique à partir de modélisations au Laboratoire national de l'Idaho, États-Unis).

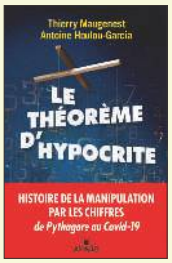
pandémie de Covid-19. La quantité d'articles scientifiques publiés a été sans précédent. Or une grande partie n'a pas été évaluée par des pairs. Pour autant, il serait stupide de rejeter tout le processus scientifique ! Cependant, les modèles mathématiques sont imparfaits. Ils peuvent offrir l'illusion de certitude quand celle-ci n'existe pas.

Mais nous entrons peut-être dans un 7e âge de l'incertitude, l'âge sombre des *fake news* [les fausses nouvelles]. Nous avons inventé et déployé une technologie — Internet — qui était censée faire le bien mais nous avons par là même donné aux démagogues, aux théoriciens du complot et aux criminels des cyber-armes qu'ils peuvent utiliser très efficacement. Certes, il n'y a rien de vraiment nouveau dans tout cela, la propagande ayant toujours été un problème comme le rappelle la légende antique de Cassandre : même lorsque nous pouvons prévoir la tragédie à venir, les gens n'écoutent pas. Pour autant, il y a peut-être de la lumière dans l'obscurité comme nous l'enseigne la pandémie de Covid-19 qui a montré qu'un virus n'est pas sensible à la propagande. La réalité ne se soucie pas de nos croyances. » ■

> « Même lorsque nous pouvons prévoir la tragédie à venir, les gens n'écoutent pas »

Propos recueillis par Olivier Hertel @OlivierHertel

SUR LE MÊME THÈME



Manipuler les nombres

DONNÉES Les chiffres, prévenait Diderot, peuvent être une aide précieuse dans l'exercice du pouvoir… à condition de n'être ni manipulés ni mal interprétés. Là est le hic. En apparence impartiaux, ils ont été — et sont encore, l'actualité ne cesse de le montrer — manipulés, parfois pour justifier l'injustifiable (les politiques eugénistes par exemple, dans le sillage des mathématiciens britanniques Francis Galton et Karl Pearson). Le message est donc clair : face aux chiffres, pratiquons assidûment le doute socratique. ■ **V. G.**

Le Théorème d'hypocrite, Antoine Houlou-Garcia et Thierry Maugenest, Albin Michel, 352 p., 19,90 €

Découvrir l'histoire des nombres

SYMBOLES Les nombres, ces symboles plus ou moins complexes formés de chiffres, sont le fruit de l'imaginaire humain. Bien plus que cela, ils font partie du ciment de nos sociétés. Commerce, fiscalité, industrie, sport… tous ces domaines dépendent (in)directement de la manipulation de ces symboles. Toutes les sociétés humaines ont apporté leur grain de sel quant à l'enrichissement de l'utilisation des nombres. Des philosophes grecs aux Mayas, en passant par la numération chinoise, de la géométrie à l'arithmétique, Grégory Chambon fait passer les nombres de l'ombre à la lumière. ■ **M. H.**

Histoire des nombres, Grégory Chambon, PUF/ Que sais-je ? 128 p., 9 €

Un pas de côté

UNIVERSALITÉ Aviez-vous déjà remarqué que lorsque vous listiez le premier chiffre de séries de nombres, de quelque nature que ce soit, vous trouviez bien plus souvent 1 que les autres chiffres ? L'air de rien, avec ce type de question et en faisant un pas de côté, le créateur de la chaîne vidéo Micmaths parvient à faire passer des notions mathématiques souvent subtiles. L'ouvrage prend le temps du développement de notre réflexion. Les cinq grands thèmes abordés sont la loi de Benford et les logarithmes, la gravitation, l'infini, la logique, et la géométrie non euclidienne. Un ouvrage très réussi qui illustre bien l'universalité des mathématiques. ■ **Ph. P.**

Le Théorème du parapluie, Mickaël Launay, Flammarion, 298 p., 19 €

BILL BLAIR / GETTY IMAGES

Depuis les étoiles jusqu'au monde subatomique, la lumière permet d'aborder toute la physique.

La belle histoire de la physique

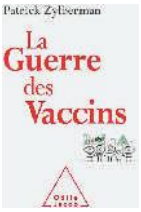
Le physicien Serge Haroche, prix Nobel 2012, traverse quatre siècles de sa discipline dans cet essai stimulant.

CONCEPTS *« Imaginons chevaucher un rayon de lumière… »* C'est ainsi qu'Einstein présentait l'une de ces expériences de pensée qui ont porté les nouvelles théories du début du XXe siècle. Cette célèbre formule pourrait être l'invitation lancée par Serge Haroche — prix Nobel de physique en 2012 — dans cet ouvrage qui s'adresse tout particulièrement à ceux qui allient le goût de la discipline à un solide bagage. Chevauchons donc un rayon de lumière pour traverser quatre siècles de physique, propose l'auteur : depuis l'éclat des étoiles jusqu'à l'étrange faculté de certains noyaux atomiques d'émettre des radiations… en passant par le monde subatomique, cet univers déroutant de l'infiniment petit dont il est si familier. L'espace et le temps eux-mêmes sont tributaires de la lumière, puisque les photons constituent les principaux messagers des astres lointains, tandis que la constance de leur vitesse dans le vide permet d'établir de précieux jalons de distances. Serge Haroche parvient surtout à porter un regard original sur une frontière mystérieuse de la physique : à quel moment le monde « classique » qui parle à nos sens bascule-t-il dans cet étrange univers quantique où un stylo posé sur une table pourrait allégrement la traverser ? Pour y répondre, l'auteur a choisi de faire dialoguer à travers les siècles trois personnalités : Pierre de Fermat, mathématicien du XVIIe siècle qui a décrit le chemin optique d'un rayon lumineux ; Pierre Louis Moreau de Maupertuis, physicien et philosophe du XVIIIe siècle qui entreprit une expédition en Laponie pour mesurer la sphéricité de la Terre ; et l'Américain Richard Feynman, décédé en 1988, dont les diagrammes représentent les interactions entre les particules. L'ouvrage, malgré son austérité, ouvre des champs de réflexion sur le sens des concepts en physique. ■ **Azar Khalatbari**

La Lumière révélée. De la lunette de Galilée à l'étrangeté quantique, Serge Haroche, Odile Jacob, 512 p., 23,90 €

Vaccins : aux racines de la défiance

OBSCURANTISME Malgré leurs bénéfices avérés pour la santé mondiale, les vaccins n'ont jamais cessé d'être dénoncés par une partie de la population, qui semble avoir plus peur d'eux que des maladies contre lesquelles ils protègent. C'est ce paradoxe que décortique l'historien de la santé Patrick Zylberman en plongeant aux racines de cette défiance aussi vieille que la vaccination elle-même. Un ouvrage très complet et richement documenté qui éclaire les ressorts historiques d'un vaccino-scepticisme particulièrement tenace en France. Une somme précieuse à l'heure où un tiers des Français déclare déjà qu'ils refuseront un éventuel vaccin contre le Covid-19. ■ **H. J.**



La Guerre des vaccins, Patrick Zylberman, Odile Jacob, 352 p., 23,90 €

Génies aveuglés

OBSESSIONS Le récit démarre fort : la composition chimique du bleu de Prusse, premier pigment synthétique créé accidentellement au début du XVIIIe siècle, conduit à la fabrication du gaz moutarde au Zyklon B, utilisé dans les chambres à gaz… Et le lecteur plonge dans un tourbillon où se succèdent les découvertes de scientifiques majeurs tels Einstein, Heisenberg, Schrödinger, ou Grothendieck. Le socle de l'écriture est documentaire, mais il cache une bombe narrative à fragmentation, qui atomise la réalité en un cocktail de fiction romanesque à suspense. Colères, espoirs, amours, rivalités et souffrances psychiques se croisent en une seule et unique route : celle de génies dévorés par leurs visions. ■ **A. de B.**

Lumières aveugles, Benjamin Labatut, Seuil, 218 p., 20 €

Défense des océans

BANDE DESSINÉE En mars 2018, le jeune dessinateur Guillaume Mazurage embarquait à bord d'un bateau de l'ONG Sea Shepherd pour sillonner avec l'équipage la mer de Cortez, à

l'ouest du Mexique. Mission : s'opposer au braconnage du totoaba, un poisson dont le trafic rapporte chaque année des millions de dollars. Mais les pêcheurs emprisonnent aussi dans leurs filets des vaquitas, le cétacé le plus rare du monde, menacé d'extinction. Cette expérience lui a inspiré une bande dessinée trépidante et pédagogique, au dessin alerte et coloré qui plaira aux jeunes lecteurs comme aux moins jeunes. ■ **S. R.**

Sea Shepherd – Milagro, Guillaume Mazurage, Robinson, 56 pages, 11,95€

Écolo-résistant

RÉSILIENCE Comment passer de la sidération, de la résignation à la résilience ? C'est la question que se posent ceux et celles qui sont en première ligne des nouvelles environnementales : scientifiques, journalistes ou militants. Les informations sont mauvaises d'où qu'elles viennent et les politiques semblent impuissantes à enrayer la crise. La réalisatrice Laure Noualhat, qui a longtemps écrit sur l'écologie pour *Libération*, analyse ici les mécanismes cognitifs et les outils qui permettent de passer outre l'écodépression, de tenir

debout et de cheminer, en s'appuyant sur de nombreux témoignages et en racontant sa propre expérience. Salutaire. ■ **R. M.**

Comment rester écolo sans devenir dépressif, Laure Noualhat, Éric Blanchet, Tana Éditions, 256 p., 18,90 €

Réconcilier la science et les citoyens

DISSENSUS Depuis qu'au printemps une théorie de médecins s'est écharpée sur les plateaux télé autour de l'hydroxychloroquine et, pire, qu'un article de la revue *The Lancet* a été retiré pour fraude massive, le virus de la défiance déferle. C'est dire si l'ouvrage *L'Art de faire confiance. Pour un nouveau contrat entre la science et les citoyens* tombe à pic. Convier le lecteur à suivre les étapes de *« la science en train de se faire »* et expliciter la méthode déployée pour *« éviter le piège des conclusions hatives »*, tel est le pari des auteurs Mathieu Farina et Elena Pasquinelli, tous deux membres de la Fondation La Main à la pâte. Foisonnant d'incises et anecdotes concrètes, l'ouvrage devient une sorte d'*« entraînement à la patience »*, à l'instar du « métier de scientifique ». Exemple type, la prétendue prolifération des loups, où l'on découvre qu'il s'agit moins de voir les animaux (et estimer leur nombre de façon bien hasardeuse) que de ramasser leurs crottes et les compter scientifiquement ! Entre piégeage avéré du boson de Higgs au Cern et lutte contre les antivaccins, une lecture engagée et engageante. ■ **Dominique Leglu**

L'Art de faire confiance. Pour un nouveau contrat entre la science et les citoyens, Mathieu Farina, Elena Pasquinelli, Odile Jacob, 256 p., 22,90 €

ihp Institut Henri Poincaré

LE CINÉ-CLUB SCIENTIFIQUE DE L'INSTITUT HENRI POINCARÉ

Au cinéma LE GRAND ACTION - 5 rue des Écoles - 75005 Paris

MARDI 29 SEPT. 2020 - 19h30

THE VISIT: UNE RENCONTRE EXTRATERRESTE

Michael Madsen - 2015

Que se passerait-il si l'être humain rencontrait des extraterrestres ? Scientifiques et responsables gouvernementaux répondent aux fantasmes, aux peurs et aux espoirs que suscitent cette interrogation.

Projection suivie d'un débat entre experts scientifiques et artistiques

En présence de :

MICHAEL MADSEN
Réalisateur du documentaire

JACQUES ARNOULD
Historien des sciences et théologien, CNES

ELISABETH PIOTELAT
Ingénieure d'études au CNRS et représentante du SETI

Entrée libre sur réservation, 7 jours avant la séance

Découvrez l'ensemble du programme 2020
www.ihp.fr/cine-club

Retrouvez les débats filmés sur la chaîne Youtube de l'Institut Henri Poincaré

PHILIPPEFITTE

La nouvelle installation recrée la sensation d'une plongée dans la Grande Barrière de corail en Australie.

Monaco/Musée

Immersion

Depuis sa création en 2006, la Fondation Albert-II-de-Monaco soutient des projets de protection et de restauration des récifs coralliens, ces écosystèmes qui ne couvrent que 0,2 % des océans, mais abritent 30 % de la biodiversité marine. Et cette année, l'Institut océanographique s'est lancé dans un programme destiné *« à mieux les faire connaître et à sensibiliser le public et les décideurs aux menaces que subissent ces écosystèmes »*. Parmi les actions menées : l'ouverture d'un nouveau parcours thématique dans le musée, qui possède l'un des plus anciens récifs coralliens vivant : voici 30 ans qu'il poursuit sa croissance en bassin. Surtout, en fin d'exposition, une installation inédite : une pièce de 250 m² sur les murs de laquelle 40 vidéoprojecteurs recréent la sensation d'une plongée dans la Grande Barrière. *« Alors que les frontières tardent à s'ouvrir, nos visiteurs pourront se projeter à l'autre bout du monde, en Australie, au cœur de la Grande Barrière de corail, pour une rencontre magique avec ses plus grandes créatures et une découverte unique de ce qui en fait la richesse, les coraux »*, explique Robert Calcagno, directeur général de l'Institut océanographique. Le visiteur interagit virtuellement avec le milieu marin, reconstitué à partir d'un mélange d'images réelles et de synthèse. Et les différentes espèces évoluent selon les déplacements et les gestes de ce plongeur imaginaire. ■

Mathieu Nowak

Musée océanographique de Monaco, avenue Saint-Martin. Rens. : +377.93.15.36.00.

EXPOSITIONS

Boulogne-sur-Mer (62)

Dans l'œil du climat
Embarqué dans une capsule qui voyage à travers le temps et l'espace, le visiteur plonge sur les récifs coralliens et dans les jungles sous-marines avant d'être confronté à diverses catastrophes : inondations, feu, tempêtes.
Nausicaá, boulevard Sainte-Beuve. Rens. : 03.21.30.99.99.

Bourges (18)

Les as de la jungle
Une exposition destinée aux enfants et présentée sous la forme d'une aventure pour les sensibiliser à la protection de l'environnement.
Muséum d'Histoire naturelle, Les Rives d'Auron, jusqu'au 6 décembre. Rens. : 02.48.65.37.34.

Marseille (13)

L'Orient sonore
Sous-titrée « Musiques oubliées, musiques vivantes » cette exposition se propose de retracer l'histoire des traditions musicales arabes menacées et de leur sauvegarde.
Mucem, 7, promenade Robert-Laffont (esplanade du J4), jusqu'au 4 janvier 2021. Rens. : 04.84.35.13.13.

Nancy (54)

Risque
Créées par la Cité des sciences, 13 manipulations pour appréhender la notion de risque.
Musée de l'Histoire du fer, 1, avenue du Général-de-Gaulle, Jarville-la-Malgrange, Rens. : 03.83.15.27.70.

Paris (75)

XXHL, giga tours et méga ponts
Consacrée à la construction « hors norme », cette exposition sur 1000 m² sensibilise aux prouesses techniques et aux savoir-faire développés par les ingénieurs, les architectes et les constructeurs.
Cité des sciences et de l'industrie, 30, avenue Corentin-Cariou, du 1er septembre au 7 mars 2021. Rens. : 01.85.53.99.74.

Notre-Dame de Paris, de Victor Hugo à Eugène Viollet-le-Duc
Récit, ponctué de reconstitutions 3D, du tournant que fut la parution du roman de Victor Hugo, en 1831, pour l'histoire de Notre-Dame. Réveillant l'intérêt du public, elle la sauva de la démolition et aboutit à sa restauration par Viollet-le-Duc.
Crypte archéologique de l'île de la Cité, place Jean-Paul-II, à partir du 9 septembre. Rens. : 01.55.42.50.10.

Saint-Germain-en-Laye (78)

D'Alésia à Rome, l'aventure archéologique de Napoléon III
À l'origine des collections du musée, les fouilles ordonnées par Napoléon III constituent une épopée archéologique à l'échelle de l'Europe et du bassin méditerranéen, en Grèce, en Italie ou en Orient.
Musée d'Archéologie nationale, domaine national, du 19 septembre au 3 janvier 2021. Rens. : 01.34.51.65.36.

Poitiers (86)

Maths & mesure — mesurer le monde
Comment les humains ont élaboré leurs moyens de mesures et leurs unités, et pourquoi, en France à la Révolution, on a voulu doter le monde d'une unité universelle : le mètre.
Espace Mendès-France, 1, place de la Cathédrale, jusqu'au 3 janvier 2021. Rens. : 05.49.50.33.08.

Rennes (35)

Feu
Accessible dès 9 ans, cette exposition propose une exploration du feu et de ses secrets mais aussi de ses dangers, sous l'angle de la science.
Espace des sciences, Les Champs libres, 10, cours des Alliés, jusqu'au 7 mars 2021. Rens. : 02.23.40.66.00.

Villeneuve-d'Ascq (59)

Tous sportifs !
Un parcours pour explorer les liens entre science et sports et découvrir les valeurs de l'olympisme. Dès 6 ans.
Forum des sciences, 1, place de L'Hôtel-de-Ville, du 12 septembre au 29 août 2021. Rens. : 03.59.73.96.00.

Retrouvez toutes les expositions dans notre guide Internet : **sciav.fr/guideexpos**

PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

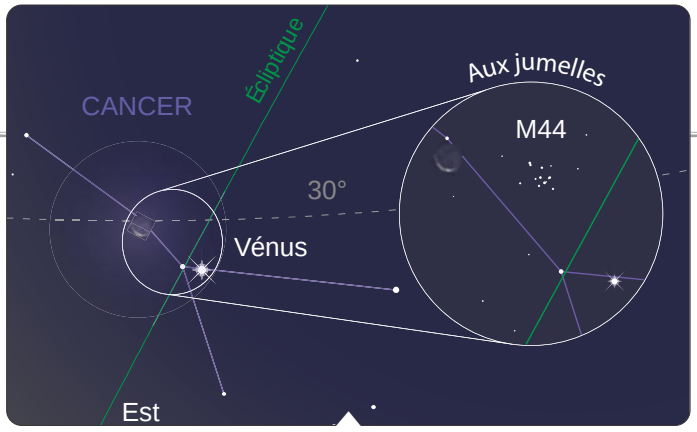
MERCURE
La petite planète est malheureusement inobservable sous nos latitudes en raison de la position de l'écliptique, beaucoup trop abaissé sur l'horizon en soirée.

VÉNUS
Par son éclat et sa hauteur sur l'horizon, l'étincelante étoile du Berger domine largement le ciel oriental de fin de nuit et du matin. Elle se lève plus de 3h30 avant le Soleil tout ce mois. Vénus quitte la constellation des Gémeaux pour celle du Cancer le 4 puis entre dans le Lion le 22.

MARS
À un mois de son passage à l'opposition, la planète Rouge se trouve dans d'excellentes conditions d'observation.
Elle se lève à la nuit tombée vers l'est et demeure visible jusqu'au petit matin. On la trouve vers le sud-ouest encore à bonne hauteur lorsque apparaissent les premières lueurs de l'aube. Sa couleur caramel est immédiatement identifiable. En fin de mois, Mars surpasse Jupiter en éclat.

JUPITER
La plus massive des planètes, très brillante, est observable en soirée et en première moitié de nuit, bas sur l'horizon. Vous la trouverez plein sud, à une vingtaine de degrés de hauteur, lorsque l'obscurité sera complète. Elle se situe actuellement dans la constellation du Sagittaire.

SATURNE
Située ce mois 8° à l'est de Jupiter, Saturne se trouve dans les mêmes conditions d'observation que sa « cousine ».



Nous sommes le 14, une heure avant le lever du Soleil. Plein est, à environ 30° de hauteur, observez aux jumelles la Lune, Vénus et la Ruche (M44).

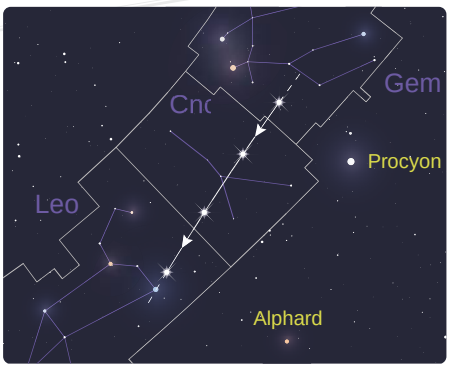
La Lune, Vénus et... la Ruche

LE MATIN DU 14, un fin dernier croissant de Lune, la planète Vénus et la Ruche seront visibles conjointement dans le champ d'une paire de jumelles. Située dans la pâle constellation du Cancer, la Ruche, appelée aussi la Crèche ou M44, est un amas d'étoiles connu depuis l'Antiquité. Visible sous un bon ciel à l'œil nu sous la forme d'une nébulosité, elle fut résolue en étoiles par Galilée. La perspective offerte par une telle observation est vertigineuse : si Vénus est en cet instant 380 fois plus éloignée de nous que la Lune, la Ruche l'est... 15 milliards de fois.

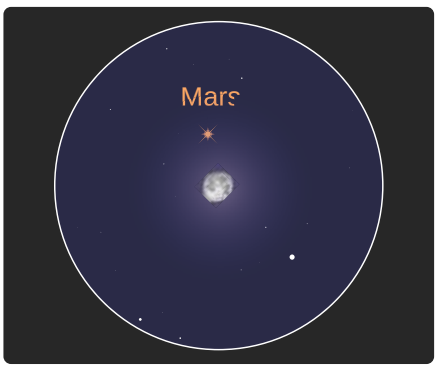
Notre conseil Repérez d'abord Vénus. C'est facile, elle est immanquable ! Vous trouverez la Ruche entre elle et la Lune.

L'appli du mois

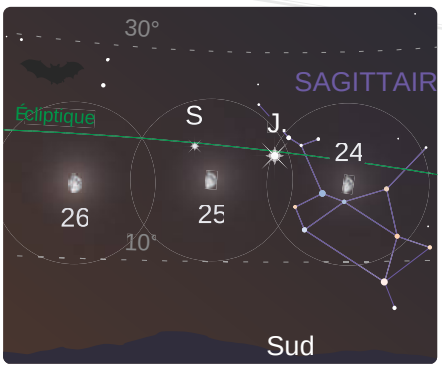
MY AURORA FORECAST est une application gratuite en français fonctionnant sous Android et iOS. Elle indique la probabilité d'observer une aurore depuis chez vous ou le lieu de votre choix, fournit des informations sur le vent solaire et sur l'activité géomagnétique du moment ainsi que des images en direct du Soleil à haute résolution.



CE MOIS, LA BRILLANTE PLANÈTE VÉNUS traverse trois constellations : les Gémeaux (Gem), le Cancer (Cnc) et le Lion (Leo). Sa position est donnée les 1er, 10, 20 et 30 septembre.



LE MATIN DU 6, UNE HEURE AVANT LE LEVER DU SOLEIL, le limbe de la Lune ne sera qu'à un demi-degré de la planète Mars, soit, justement... le diamètre apparent de la pleine Lune.



LE SOIR DU 25, UNE HEURE APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, tournez-vous vers le sud. La Lune en phase gibbeuse croissante sera à 7° de la planète Jupiter et à 3° de la planète Saturne.

PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

Arithméticiens entre eux

Quarante et un arithméticiens se retrouvent à un congrès : des Américains, des Européens et des Chinois. Leurs droits d'inscription totalisent 120 €, correspondant à
- chaque Américain : 12 €
- chaque Européen : 9 €
- chaque Chinois (invité) : 1 €

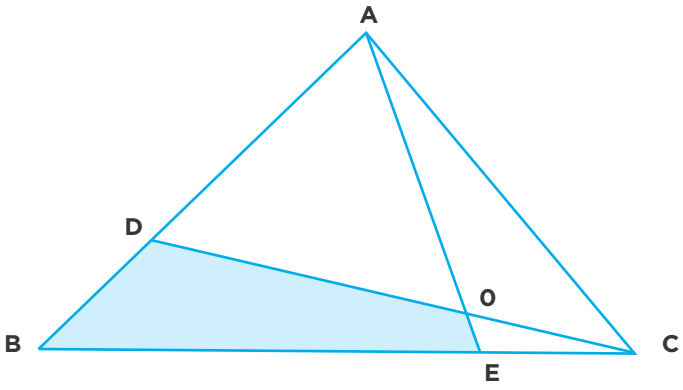
Saurez-vous en déduire le nombre exact d'Américains, d'Européens et de Chinois ?

Un quadrilatère dans le triangle

Dans ce triangle, deux lignes partant d'un sommet et aboutissant chacune au côté opposé délimitent un quadrilatère. Or l'aire du quadrilatère peut être obtenue comme fraction de l'aire du triangle si l'on sait quelles fractions de côtés sont définies par les pieds des sécantes.

Donc si D est au tiers de BA, E au quart de CB et l'aire totale du triangle 720, quelle aire occupe BDOE ?

Les aires définies par une sécante sont proportionnelles aux segments qu'elle délimite.



Une addition très littéraire

Malgré les apparences, cette addition peut être juste si chaque lettre est remplacée par un même chiffre, ce qui utilise les dix chiffres. Saurez-vous la rendre juste ?

```
  S E P T
+ H U I T
= O N Z E
```

Codes personnels

J'ai noté sur mon carnet :
André : UI
Bernadette : AI
Claude : EEI
Didier : EUI
Elvire : EEI
François : AEI

Que peut-on s'attendre à lire sur la ligne suivante, correspondant à Georgette ?

Citations croisées

Retrouvez une phrase d'Albert Einstein. Chaque lettre provient d'un mot d'une phrase de Blaise Pascal dont le numéro est indiqué.

LA	SUCCESSION	DE	CHERCHEURS	EST	COMPARABLE
1	2	3	4	5	6
À	**UN**	**SEUL**	**HOMME**	**QUI**	**APPREND**	**INDÉFINIMENT**
7	8	9	10	11	12	13

| | | |

QUAND VOUS REFERMEZ UN

UNE NOUVELLE VIE S'OUVRE À LUI.

EN TRIANT VOS JOURNAUX, MAGAZINES, CARNETS, ENVELOPPES, PROSPECTUS ET TOUS VOS AUTRES PAPIERS, VOUS AGISSEZ POUR UN MONDE PLUS DURABLE. DONNONS ENSEMBLE UNE NOUVELLE VIE À NOS PRODUITS.

CONSIGNESDETRI.FR

CITEO

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio

ELU PRODUIT DE L'ANNÉE 2020

L'OR BARISTA

ENFIN, UNE MACHINE*.

DOUBLE ESPRESSO,
DOUBLE PLAISIR.

*EN UTILISANT UNIQUEMENT UNE CAPSULE XXL DOUBLE ESPRESSO L'OR BARISTA

JACOBS DOUWE EGBERTS FR SAS - 30 BIS RUE DE PARADIS, 75010 PARIS, FRANCE - 810 029 413 RCS PARIS - SAS AU CAPITAL DE 16.594.157,70 EUROS.